Institut National de Médecine Agricole

14 rue Auguste Comte - 37000 TOURS
☏ 02 47 66 61 07 - 🖷 02 47 66 08 28
contact@inma.fr - http://www.inma.fr

Siège social :
INMA - Faculté de Médecine
10 bd Tonnellé - 37032 Tours cedex

Evolutions environnementales et santé. Et en agriculture ?

XXXVe Symposium de l'INMA

Vendredi 19 septembre 2008

Centre des Congrès Vinci - Tours

Programme

Evolutions environnementales et santé. Et en agriculture ?

XXXVe Symposium de l'INMA

Placé sous le Haut Patronage du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

Modérateur
Mr Henri POINSIGNON,
Directeur Général, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort

Accueil - Introduction
***Pr Patrick CHOUTET**, Président de l'INMA*
***Dr Dominique LACHAUD,** Conseil Général d'Indre-et-Loire*

Plusieurs siècles de progrès et de craintes pour l'environnement.
***Dr Alain CAUBET**, toxicologue, chargé d'enseignement d'Histoire de la médecine, Centre antipoison, Hôpital Pontchaillou, Rennes*

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle, sous le regard du citoyen.
***Pr Jean-François CAILLARD,** Service de médecine du travail et pathologie professionnelle, CHU Charles Nicolle, Rouen*

Notre santé à l'épreuve du changement climatique.
***Pr Jean-Pierre BESANCENOT**, Centre d'épidémiologie des populations, Laboratoire «Climat et santé», Faculté de médecine, Dijon*

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes. A quoi devons-nous nous préparer ?
***Dr Dounia BITAR**, Département des maladies infectieuses, Institut de veille sanitaire, Saint Maurice*

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes. Actualités du monde animal.
***Pr Marc ARTOIS**, Ecole nationale vétérinaire, Lyon*

Modérateur
Monsieur François HEYMAN,
Membre du Conseil Economique et Social
Membre du Conseil National de l'Alimentation

Environnement professionnel et santé. Des effets immédiats aux impacts à long terme, quels facteurs de risque savons-nous identifier ?
***Pr Alain BERGERET**, Université Claude Bernard, Lyon 1, UMR T 9405,*

Des nouveaux produits dans notre environnement : les particules nanostructurées.
***Mr Bernard CATHALA**, Directeur de recherche, Unité Biopolymères, Interactions et assemblage, Institut National de la Recherche Agronomique, Nantes*

Des nouveaux organismes dans notre environnement : les organismes génétiquement modifiés (OGM). Impacts sur la santé.
***Mr Louis-Marie HOUDEBINE**, Directeur de recherche, INRA, Jouy-en-Josas. Expert au Comité d'étude biotechnologie de l 'AFSSA et à l'Agence européenne de la sécurité des aliments*

Conclusion – Evaluation.
Pr Patrick CHOUTET

Sommaire

Plusieurs siècles de progrès et de craintes pour l'environnement..... 7
***Dr Alain CAUBET**, toxicologue, chargé d'enseignement d'Histoire de la médecine, Centre antipoison, Hôpital Pontchaillou, Rennes*

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle, sous le regard du citoyen..... 21
***Pr Jean-François CAILLARD,** Service de médecine du travail et pathologie professionnelle, CHU Charles Nicolle, Rouen*

Notre santé à l'épreuve du changement climatique..... 43
***Pr Jean-Pierre BESANCENOT**, Centre d'épidémiologie des populations, Laboratoire «Climat et santé», Faculté de médecine, Dijon*

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes. A quoi devons-nous nous préparer ?..... 71
***Dr Dounia BITAR**, **Dr Didier CHE, Dr Jean-Claude DESENCLOS,** Institut de veille sanitaire, Saint Maurice*

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes. Actualités du monde animal..... 89
***Pr Marc ARTOIS**, Ecole nationale vétérinaire, Lyon*

Environnement professionnel et santé. Des effets immédiats aux impacts à long terme, quels facteurs de risque savons-nous identifier ?... 97
***Pr Alain BERGERET**, Université Claude Bernard, Lyon 1, Lyon UMR T 9405,*

Des nouveaux produits dans notre environnement : les particules nanostructurées..... 107
***Mr Bernard CATHALA**, Directeur de recherche, Unité Biopolymères, Interactions et assemblage, Institut National de la Recherche Agronomique, Nantes*

Des nouveaux organismes dans notre environnement : les organismes génétiquement modifiés (OGM). Impacts sur la santé..... 127
***Mr Louis-Marie HOUDEBINE**, Directeur de recherche, INRA, Jouy-en-Josas. Expert au Comité d'étude biotechnologie de l 'AFSSA et à l'Agence européenne de la sécurité des aliments*

▣◘▣

Complément aux actes :

Les nanomatériaux – Sécurité au travail.....151
Avis de l'AFSSET, juillet 2008

Emissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage.....159
***Bernard SEGUIN,** INRA, Mission Changement climatique et effet de serre, Unité Agroclim, site Agroparc, Avignon*
***Jean-François SOUSSANA,** INRA, Unité d'Agronomie, Clermont-Ferrand*

Paru dans « Le Courrier de l'Environnement de l'INRA » Février 2008

Plusieurs siècles de progrès et de craintes pour l'environnement

Dr Alain CAUBET

Maître de conférences des Universités
Praticien hospitalier
Centre antipoisons de Rennes – CHU de Rennes

Il ne faut pas demander à un récit du passé d'éclairer crûment la période présente. Ceci posé, il reste très instructif. Notre intention ne peut être, en si peu de lignes, de retracer les évolutions de l'état de santé des travailleurs du monde agricole, ni même de la législation qui la protège. Les contributions prévues pour la suite de cette journée nous incitent à développer le thème de l'intervention des agents chimiques dans les progrès de l'Agriculture en France et de l'intervention de l'État dans la régulation de leur emploi. Jusqu'aux années 1960, leur usage était encouragé par tous ; depuis, le discours s'est morcelé en opinions diverses, en un continuum allant de l'enthousiasme au refus absolu des « pesticides ». La polémique est vive, et prend un tour dénonciateur depuis une dizaine d'années. Il appartient aux chercheurs d'avérer telle ou telle assertion des divers argumentaires. Qu'il soit clair que nous ne souhaitons que rappeler un contexte.

Du déficit à l'excédent agricole

Les Gaules chevelues, ancien nom de notre belle France, ont contribué à l'approvisionnement de Rome et aux 44 litres de blé mensuels donnés à chacun des deux cent mille citoyens bénéficiaires des *frumentationes* depuis Auguste. Les siècles passant, les terres s'épuisèrent et ce grenier à blé, comme les autres, parut sans ressource dès le XIII^{e} siècle, avec des rendements en constant déclin. Sans la moindre indication chiffrée précise, mais par l'observation des changements des méthodes culturales, nous devons convenir de ce lent affaissement.

L'approvisionnement de la France est resté fragile jusqu'à une époque récente. En ce début de XXI^{e} siècle, nous imaginons que notre pays a de tout temps été au moins autosuffisant, voire un puissant exportateur de nourriture. Rien n'est plus faux. Si la production française est vers 1880 dans les toutes premières, sinon la première pour le vin et le froment, le commerce extérieur agricole est déficitaire même si l'on exclut les denrées exotiques, obligatoirement importées[1]. À la Belle Époque, le pays se flatte d'être autosuffisant, mais les mauvaises récoltes et la concurrence étrangère ou coloniale font peur ; la guerre purge ces illusions[2].

> *Depuis plus de cinquante ans, le pays achète à l'étranger de grosses quantités de grains, de farines. L'excédent des importations sur les exportations marque l'évolution qui s'est produite dans l'agriculture : dans les dix dernières années qui suivirent 1900, malgré des rendements accrus, nous fûmes tributaires de l'étranger à raison de 2 millions et demi de quintaux par an. Ces besoins sont aujourd'hui quintuplés ; au cours des quatre dernières campagnes, l'excédent des importations sur les exportations atteint 52 millions de quintaux de blé, soit plus de 12 millions de quintaux par an ! Un jour par semaine, le peuple de France mange du pain acheté à l'étranger. Cependant, la production de seigle, d'orge, d'avoine qui jadis excéda les besoins du pays, est devenue incapable de les satisfaire. …/… Un jour sur dix, cette année, le peuple de France a mangé de la viande achetée à l'étranger*…[3]

Ce n'est que dans les années 1950 que la France devient un exportateur net de produits agricoles ; le productivisme est une des composantes de la douloureuse

[1] Desert G., *Prospérité de l'agriculture*, in *Histoire de la France rurale*, tome 3, sd G. Duby et A. Wallon, Le Seuil ed., Paris, 1976, p. 249

[2] Gervais M., Jollivet M., Tavernier Y., *L'agriculture dans l'économie mondiale*, in *Histoire de la France rurale*, sd G. Duby et A. Wallon, tome 4, Le Seuil ed., Paris, 1977, pp 23-32

[3] J. Faure, sénateur, discours en présence du Président de la République (Paul Doumer), 5 novembre 1931 ; In E. Bernard, *Le problème de l'azote en France*, Thèse de Droit, Poitiers, 1933, p. 51-52

métamorphose du monde rural. Avec l'ouverture des marchés[4], commence un rattrapage violent et désordonné, purgeant de façon précipitée cent ans de rêve d'autarcie et d'idéologie du « petit propriétaire », idéal social de la III[e] République. Aussi, l'agriculture française a-t-elle dû changer en quarante ans plus que pendant les temps historiques. Plusieurs dizaines de thèmes de recherches sont possibles et tous insistent sur les bouleversements subis[5] : la sélection des grains et des animaux, le remembrement, le mode de faire valoir, le couvert forestier, les jachères, la main-d'œuvre, les rôles respectifs des hommes et des femmes, l'emprunt, la concurrence, la spéculation, les subventions, le contrôle des administrations, la formation professionnelle…

On le voit, ce n'est donc qu'un tout petit aspect de cet ensemble que relate notre propos, celui de l'apport de substances issues de l'industrie chimique, cofacteur parmi d'autres des succès et des dérives possibles de notre pays et en nous limitant à une époque assez lointaine, afin d'éviter la période de turbulence actuelle.

Les engrais

L'abondance doit d'ailleurs être le premier et peut-être le seul objet des cultivateurs. C'est presque par cette sentence que M. le Roy, lieutenant des chasses de Versailles, conclut son article sur les engrais dans l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert. Il n'y détaille que l'usage des marnes, des fumiers, le parcage des moutons sur la parcelle à fumer. L'alternance de cultures et l'appel aux jachères termine la liste de ses armes. Comme souvent, l'indolence des cultivateurs est signalée comme l'obstacle à tout progrès[6]. L'amélioration des sols donnait des résultats dont il fallait bien se satisfaire : aucune étude sérieuse ne donnait de preuve absolue d'efficacité, tant les aléas de la culture étaient grands, tant rares étaient les passionnés d'agriculture ; il fallait être riche propriétaire, avoir des loisirs, ou être exilé de la cour pour s'enticher sérieusement de cette agronomie que l'on n'osait qualifier de science. L'empirisme et les recettes locales étaient la règle[7], d'autant que le bilan des expériences prenait des années, de récolte en récolte, lesquelles étaient soumises à bien des influences autres que celles des bonificateurs du sol.

Théodore de Saussure[8] (1767-1845) ruina la théorie admise de l'humus qui supposait que les racines puisent une nourriture toute faite pour elles dans le sol. Il démontra au contraire que les sels minéraux que l'on retrouve dans les cendres végétales viennent du sol et non de l'eau ou de l'air ambiants. Il fit pousser des plantes hors-sol. Il démontra la respiration cellulaire : le gaz carbonique est absorbé par les

---

[4] Cette ouverture a certes débuté dès Napoléon III avec le Traité franco-britannique, mais elle a été très lentement progressive et a connu des retours en arrière.

[5] G. Duby et A. Wallon, (sd), *Histoire de la France rurale*, tome 4, Le Seuil ed., Paris, 1977, *passim*

[6] *Un souffle de vie répandu sur la pratique pénible de ce qu'on sait, développeroit des connoissances qui ne sont étouffées que par le peu d'intérêt qu'on trouve à les employer. Dans tous les arts, une routine languissante est le partage du plus grand nombre des praticiens : l'activité & l'industrie en distinguent quelques-uns ; & ce sont elles qui paroissent multiplier les ressources entre leurs mains. Il en est ainsi dans l'Agriculture : un laboureur attentif trouvera des moyens d'engraisser ses terres, qui, quoique rarement employés, n'en sont pas moins connus de tout le monde ; & son exemple ne réveillera peut-être pas la stupidité de ses voisins.* Cet article est de taille moyenne dans l'ensemble de l'Encyclopédie ; il compte 3400 mots. L'auteur a donné 134 autres articles, surtout sur les arts mécaniques et dans une moindre mesure sur l'agriculture, les chasses et forêts.

[7] Bourrigaud R., *Chimie et agriculture, : les origines bretonnes d'un mariage presque séculaire*, in *La Bretagne des savants et des ingénieurs*, 1825 – 1900, sd J. Dhombres, Centre de culture scientifique, technique et industrielle et Ouest France ed., Rennes, 1994, pp 101-113

[8] Saussure T. de, *Recherche chimique sur la végétation*, Vve Nyon ed., imp Didot jeune, Paris, an XII (1804), 376 p.

feuilles le jour et l'oxygène la nuit. L'azote est absorbé via les racines. Justus von Liebig (1803-1873) poursuivit et renforça les démonstrations de Saussure et passa à l'étape suivante qui était celle des engrais et au delà, celle de la bonification des sols stériles. Expérimentateur universel et entrepreneur hardi, il mit au point divers mélanges selon la culture à entreprendre. Jean-Baptiste Boussingault (1802 - 1887) auteur de *Agronomie, chimie agricole et physiologie*, Jean-Baptiste Dumas (1800 - 1884), Georges Ville[9] (1824 - 1897) apportent les premiers et indispensables perfectionnements car il y a loin de la théorie chimique aux complexes réalités du métabolisme des plantes. L'espoir de rendements multipliés suscite une industrie nouvelle, aux lourds investissements. Les matières premières en sont importées (guanos du Pérou − 1840, soufre), extraites (mines diverses : potasse, dolomie), récupérées (scories de fours Thomas, varech brûlé[10], os et autres matières phosphorées, etc.). Les substances et procédés sont très variés et la loi du 4 février 1888 donne encore une liste bien longue, dans son article 5 : *des fumiers, des matières fécales, des composts, des gadoues ou boues de ville, des déchets de marchés, des résidus de brasserie, des varechs et autres plantes marines pour engrais, des déchets frais d'abattoirs, de la marne, des faluns, de la tangue, des sables coquilliers, des chaux, des plâtres, des cendres ou des suies provenant des houilles ou autres combustibles.* Toutes ces recettes ne s'éteindront économiquement qu'avec la guerre de 1914-1918.

Lorsque les chimistes ont proposé un amendement des sols, les paysans français ont été réticents et n'en ont accepté le principe et la pratique que lentement. Nos voisins s'y sont convertis plus vite, plus vigoureusement, aggravant notre retard de productivité globale. Reflet des hésitations de l'opinion en ce qui concerne les engrais, le *Grand Dictionnaire Universel* (GDU) de Pierre Larousse[11], dans son article [Engrais] (tome VII paru en 1872) rapporte les découvertes de Liebig et de Georges Ville, tendant à montrer que les plantes ne se nourrissent que de minéraux bien précis et en proportions bien définies ; curieusement, la suite de l'article est un plaidoyer vibrant, presque lyrique, pour les engrais organiques dont l'« engrais humain »[12], le produit des abattoirs[13], mais aussi un mélange de sang et de charbon ayant servi aux amidonneries et aux féculeries[14]. Le GDU cite avec faveur un expert inattendu dans ces domaines, Victor Hugo, qui dans *Les Misérables*[15], exige que les égouts ne se déversent plus au loin, dans la mer, mais dans nos campagnes ; le grand homme aurait même écrit *Grâce à l'engrais humain, la terre en Chine est encore aussi jeune qu'au temps d'Abraham.* Le tiers final de l'article est constitué par l'appel à une législation enfin répressive contre le « vol à l'engrais », falsification paraît-il commune en ces temps, et que la loi ne pouvait réprimer[16], (en attendant la loi de 1905 sur les falsifications). Cette peur du « vol à

[9] Georges Ville, fils de Louis Bonaparte et donc demi-frère de Napoléon III qui soutint ses travaux, fit de nombreuses mises au point et une propagande continue pour les « engrais chimiques ». C'était d'ailleurs le nom de sa publication, plusieurs fois rééditée. La ferme expérimentale du bois de Vincennes, qu'il créa grâce au patronage du régime, porte son nom.

[10] Le mot potasse trouverait son origine dans ces combustions, par le rapprochement de mots anglais : *pot* et *ash*, c'est-à-dire : creuset et cendres.

[11] Le GDU parut en 17 tomes entre 1863 et 1890. Plusieurs thèses de médecins soutenues à Rennes ont montré le sérieux de ses sources quand il aborde certains thèmes scientifiques.

[12] Mélange d'excréments humains, de poudrette et de charbon ou de terreau carbonisé.

[13] Le sang coagulé, soit par l'ébullition, soit par un acide, ou mélangé au trentième de son poids environ avec une substance antiseptique et absorbante, comme le charbon poreux ou la terre végétale calcinée, forme le mélange connu sous le nom de noir animalisé, très employé par les agriculteurs.

[14] Le mélange de noir animal et de sang de bœuf, destiné à clarifier le sucre est connu dans le commerce sous le nom de noir ou résidu charbonneux des raffineries.

[15] V. Hugo, *Les Misérables*, tome II, chapitre : « La terre appauvrie par la mer ».

[16] Le Nantais Adolphe Bobierre avait, dans sa ville, obtenu que les marchandises dites « engrais » fussent entreposées dans un même lieu, étiquetées et contrôlées par un chimiste. Les fraudes étaient, paraît-il, communes et faciles. Bobierre en disait : *La science des sophistications des noirs de raffinerie a progressé à Nantes plus rapidement que la connaissance des essais analytiques*.

l'engrais » se manifeste aussi par leur inscription dans les buts du premier syndicat agricole français, le Syndicat des agriculteurs du département du Loir-et-Cher, fondé le sept juillet 1883 par un professeur d'agriculture, Jules Tanviray :

> *l'achat en commun des engrais, des semences et de toutes les matières et objets fréquemment utilisés en agriculture, afin de les obtenir à meilleur marché ; réprimer la fraude dans le commerce des engrais et des graines de semence ; éclairer les agriculteurs sur les choix des matières fertilisantes convenables*. [17]

Le monde paysan n'a eu en France qu'un tardif recours aux engrais minéraux, tant par routine et méfiance que par manque de moyens. Détailler les statistiques incomplètes dont nous disposons sur les tonnages vendus, serait fastidieux. Elles montrent une lente progression, toujours inférieure à celle de nos voisins et concurrents[18]. Là se fixait une des inquiétudes stratégiques du pays : être autosuffisant, ne rien payer à nos voisins, ne subir aucun chantage alimentaire.

Survient la Grande Guerre. La récupération des mines de potasse d'Alsace (article 74 du Traité de Versailles – 28 juin 1919), la fabrication plus aisée de l'azote grâce à la confiscation du procédé Haber-Bosch[19] (article 297 du Traité de Versailles) comme compensation de guerre, devaient permettre de produire bien davantage et à un moindre coût[20]. Malheureusement, les atermoiements du Parlement (quatorze ans de débats pour donner un statut juridique aux mines domaniales des potasses d'Alsace[21]), les tactiques des industriels et les exigences de l'État-major (par exemple la lente et difficile création de l'Office national industriel de l'azote et son implantation à Toulouse, celle de l'usine d'AZF[22]) compliquèrent beaucoup les plans ambitieux entrevus au moment de la Victoire[23]. Il reste que l'État était vigilant sur les buts à long terme de la Nation, et son entente avec les entreprises du secteur tendait à promouvoir l'emploi le plus large possible des fertilisants. Il favorisa la propagande. Mais comment convaincre les agriculteurs ? On fit d'abord le pari de la proximité :

- 1879 (loi du 16 juin) : création de chaires départementales d'agriculture, ayant pour rôle de faire des cours aux futurs instituteurs et des conférences aux agriculteurs, faire des travaux et recherches ;
- 1881 (circulaire du 15 janvier) : précisions données aux professeurs départementaux ;

(Bourrigaud R., *op. cit.*, pp 112). Bobierre avait été surnommé « le Pierre l'Ermite des engrais » en souvenir du prédicateur de le première croisade.

[17] F. Clerc, *Le syndicalisme, présentation du syndicalisme agricole français*, in *Origine et développement des organisations agricoles en France, témoignages et partages d'expériences,* septembre 1997.
http://www.inter-reseaux.org/IMG/doc/France_histoire_Orga_agricole_Lebot.doc

[18] Caubet A., Baert A., *Bref historique du rôle des produits phytosanitaires*, in *Produits phytosanitaires : intoxications aiguës et risques professionnels*, sd F. Testud et J.-P. Grillet, ESKA ed., Paris, 2007, pp 17-25

[19] Fritz Haber réussit cette synthèse de NH_3 en 1906. L'azote venait de l'air et l'hydrogène du gaz naturel. Il fallait utiliser une énergie considérable pour cette synthèse : une température de 450°c et 200 atmosphères. Carl Bosch mit au point la réalisation industrielle en 1912. C'est pendant la guerre que l'Allemagne, empêchée par le blocus d'acheter du nitrate de soude du Chili, se convertit massivement à ce procédé, chez la BASF surtout. D'autant que l'acide nitrique que l'on obtenait aussi, servait aux explosifs nitrés.

[20] « Le Parlement attendait 'une exploitation intensive', voulait garantir à l'agriculture française un tonnage minimum et des prix de faveur ». Douffiagues J.-A., *Un essai d'économie organisée : la politique industrielle de la potasse*, thèse pour le doctorat de droit, Paris, 1933, p. 164

[21] Aubert R., *Le problème français des potasses*, thèse pour le doctorat de Sciences politiques et économiques, Paris, 1933, p. 16

[22] In E. Bernard, *op. cit.,* p. 130-131

[23] Ainsi, malgré le procédé Haber, et celui, français de Georges Claude, la production d'azote restait difficile, puisque en 1928, par exemple, les importations coûtaient au pays plus de 700 millions de Francs, soit près de 70 % de la consommation. (In E. Bernard, *op. cit.,* p. 45)

- 1885 (circulaire du 24 décembre) : généralisation des champs d'expériences et de démonstrations
- 1894 : octroi de subventions d'État pour ces champs et démonstrations ;
- 1912 (loi du 12 août) : création des Directions des services agricoles ;
- 1919 (loi du 6 janvier) : création des Offices régionaux et départementaux d'agriculture ;
- 1921 (loi du 30 avril) : création de l'Institut des recherches agronomiques[24].

Plus tard, à la Libération, (18 mai 1946) l'INRA aura pour charge de coordonner les efforts.

Le « Syndicat national de propagande pour développer l'emploi des engrais chimiques » fut créé le 27 juillet 1927. Il continua d'utiliser les méthodes publicitaires des services promotionnels des cartels de fabricants : tracts, affiches, films, conférences et aussi le « Train des engrais », exposition ambulante sur le réseau des Chemins de fer de l'État[25]. Entre les deux guerres, le discours des ingénieurs à propos des paysans est encore d'un ton qui gêne aujourd'hui[26].

Un marché promis à un tel développement, soutenu par les Pouvoirs Publics, et s'adressant à une si vaste clientèle devait nécessairement attirer les aigrefins. Les dérives désolaient les industriels et revendeurs honnêtes qui risquaient d'être enveloppés dans le même discrédit que les bonimenteurs itinérants. Avec ses lamentables et exaspérantes lenteurs, la machine politique de la III^{e} République finit par promulguer un texte, la loi du 4 février 1888, laquelle dans son article 4 stipulait : *La teneur en principes fertilisants sera exprimée par les poids d'azote, d'acide phosphorique et de potasse contenus dans 100 kilogrammes de marchandise facturée*. Pour l'anecdote, des fraudes aux engrais étaient si connues du grand public, qu'Octave Mirbeau, en 1903, donna une pièce de théâtre, *Les affaires sont les affaires*, et y fit une nette allusion, quand l'ignoble Isidore Lechat, se promet à leur sujet une fructueuse manipulation. Le service de répression des fraudes du ministère de l'Agriculture se montra pointilleux et on a pu dire que le marché des engrais était assaini avant la Seconde Guerre mondiale.

Associées, réclame et propagande firent lentement leur effet et les agriculteurs tant par attrait que par nécessité en vinrent à la fumure artificielle. La consommation a connu une très vive hausse entre 1960 et 1990 pour décliner depuis. Certains en vinrent aussi à faire n'importe quoi, n'importe quand. La consommation diminue en Europe. La plupart des terres agricoles d'occident peuvent bénéficier aujourd'hui d'une compensation proportionnée aux « exportations » de minéraux (récoltes et entraînement par lessivage). Les pays d'Asie débutent le cycle que nous avons quitté et prennent notre place de principaux utilisateurs de fertilisants. Le poète se serait-il trompé ?

---

[24] E. Bernard, *op. cit.,* p. 149-150

[25] In E. Bernard, *op. cit.*, p. 153

[26] Citation tirée de E. Bernard, *op. cit.* :

- *Quelque lent et routinier que soit l'esprit des agriculteurs, l'exploitant s'est vite aperçu de l'importance de la fumure azotée complémentaire.* (p. 44)
- *L'ouvrage de vulgarisation, rédigé par son directeur, M. Lenglen*, « Pourquoi, où, quand et comment employer les engrais » *est ce qui se fait de mieux comme effort de vulgarisation. C'est le chef-d'œuvre du genre, il devrait être le livre de chevet de tout agriculteur, du gros exploitant instruit au modeste paysan.* (p. 153)
- *L'agriculteur est un homme de bon sens, mais réfractaire à la chimie, même agricole. Beaucoup de paysans n'ont pu encore assimiler cette idée simple, qu'il est trois catégories d'engrais qui se complètent, ne se remplacent pas, et ne sont pas concurrents : azote, acide phosphorique, potasse.* (p. 201)
- *Comment veut-on qu'ils arrivent à se reconnaître dans cette pharmacopée nouvelle des seuls engrais azotés ? Depuis la guerre, au nitrate de soude, au sulfate d'ammoniaque, à la cyanamide, sont venus s'ajouter 23 engrais azotés. Ils en sont tout éberlués et y perdent la tête et ce chaos nuit beaucoup à la diffusion de l'azote fertilisant.* (p. 202)

Les autres substances nécessaires à l'agriculteur

Après les attaques de l'oïdium qui débutent en 1840, des raffineries de soufre furent implantées sur la côte méditerranéenne, à Marseille, Sète, Béziers, où jusqu'à la dernière guerre, certains moulins broyaient alternativement du blé et du soufre. Vers 1880, le soufre noir fut récupéré des usines à gaz, mais ne représenta que peu de choses face aux besoins (autour de 10 %). Uni au soufre, le cuivre permet d'obtenir la bouillie bordelaise, imposée par le mildiou après 1878. C'est la région marseillaise qui concentrait cette activité industrielle. Entre les deux guerres, le doryphore qui s'attaque aux solanacées amène à la constitution d'atelier de fabrication de vert de Paris qui est une bouillie arsenicale[27], dans la France du Nord et de l'Ouest, celle de la pomme de terre[28]. Après guerre, c'est le DDT[29] qui contrôlera cet insecte venu d'Amérique.

En attendant, le commerce national endurait d'écrasantes importations. Le soufre (89 000 tonnes importées de Sicile et des États-Unis), le sulfate de cuivre (100 000 tonnes importées du Congo) pesaient sur nos comptes, d'autant que les cours se formaient à l'étranger. Le pyrèthre venait largement de Dalmatie, la roténone des îles de la Sonde et d'Amérique du Sud. L'arsenic, le fluor, la nicotine, les dérivés de la houille, étaient de production nationale et ne manquaient pas, eux[30]. Cette dépendance vis-à-vis de fournisseurs étrangers n'était pas acceptable dans notre pays qui avait subi le quasi-blocus de la Grande Guerre et le blocus associé aux pillages de l'Occupation allemande.

> *Le viticulteur ne peut se passer de cuivre et l'expérience des trois années 1941, 1942 et 1943 a surabondamment prouvé que rien ne pouvait, tout au moins pour le moment, le remplacer.*[31]

Un autre de nos handicaps était la fragilité des entreprises du secteur, leur grand nombre, intervenant à des degrés divers dans la fabrication, la livraison, le stockage, la recherche. Aucune n'avait une gamme complète. On se promettait, par la

---

[27] Acétoarsénite de cuivre

[28] L'arsenic avait l'inconvénient bien connu d'être à l'origine de terribles accidents et l'agent de crimes dont certains restaient impunis et donc parfaits. Sa détection avait fait de beaux progrès (F.-X. Legagne, *Recherche et dosage de l'arsenic avant 1914***,** Thèse Pharmacie Rennes 1997, n° 42) et les revues savantes avaient à peu près fait le tour de ses dangers (Y. Le Flohic, *L'arsenic dans les Annales d'hygiène publique et de médecine légale, de 1829 à 1922*, Thèse Médecine Rennes, 1999, n° 39). Quelques aspects, les pires, restaient à prouver ; le CIRC a lié l'exposition à l'arsenic au cancer des bronches en 1987. L'État était sollicité pour réduire les risques dus à ce poison. La loi du 12 juin 1893 (décret du 10 mars 1894, et ses reprises en 1894 et 1913) sur l'hygiène des fabriques le concernait assez généralement ; le 29 juin 1895, un cas particulier fut fait pour la fabrication du vert de Schweinfurt. La loi du 12 juillet 1916 vint renforcer les dispositions de la loi de 1845 et créa les tableaux A (substances toxiques), B (substances stupéfiantes) et C (substances dangereuses). Fait pour les médicaments, ce texte s'appliqua aussi à l'arsenic agricole, inscrit dès lors au tableau A. Son commerce était enfin encadré de façon efficace ; les précautions imposées aux apothicaires puis aux pharmaciens n'avaient pas manqué mais l'usage agricole portait sur de telles quantités que les précautions prises pour la mort aux rats et contre les invasions de mouches ne pouvaient plus être appliquées. La vente fut restreinte aux sels insolubles, dits moins dangereux. Il reste que la poursuite des irrégularités fut timide (R. Joffard, *La réglementation des substances vénéneuses en agriculture et la phytopharmacie, le rôle du pharmacien dans la défense des cultures*, Thèse droit Paris, Les Éditions techniques, 1948, 118 p., *passim*) ; le *Larousse agricole* de 1921 donne encore des recettes variées de bouillies arsenicales qui supposent de disposer de toutes formes d'arsenic.

[29] D. Poulain, *La pomme de terre*, in *Histoire et chronologie de l'agriculture française,* sd D. Poulain, Ellipses ed., Paris, Paris, 2004, p. 70

[30] Notions valables dans l'immédiat avant guerre de 1940 et à laquelle on craignait de revenir au temps de le reconstruction.

[31] Berton C., *L'industrie française des produits chimiques antiparasitaires*, Thèse de Droit, Aix-Marseille, 1948, p. 19

« consolidation » et « l'intégration » de ce secteur économique de rivaliser enfin avec les Allemands, bien identifiés comme concurrents alors qu'en fait, durant ces années d'immédiat Après-guerre, les USA avaient pris une belle avance dans la chimie de synthèse. Le circuit de distribution aussi devait être réformé : cela supposait des « spécialités » à la composition fixée, avec un ordre de mélange, un mode d'emploi précis, d'autant que tous les composants imaginables étaient des poisons[32]. Cette interdiction faite à l'agriculteur de réaliser lui-même les mélanges dictés par l'usage ou parfois par sa fantaisie, avait commencé pour l'arsenic dès 1916 ; il s'agissait de l'étendre. Dans les années qui précédèrent et suivirent la Guerre, quelques pharmaciens entreprenants revendiquèrent d'être les titulaires de ce commerce de la phytopharmacie. À leurs yeux, elle ressortait de leur antique commerce des poisons[33]. Le législateur leur avait d'ailleurs réservé la vente de plusieurs pesticides (extraits de la noix vomique ou strychnine, phosphure de zinc, …). Même dispersé et divisé, le petit monde des 392 entreprises impliquées dans la branche d'activité des pesticides (décompte du Comité d'Organisation des Industries chimiques en 1943) ne céda pas et bientôt, on n'en parla plus[34].

Comme pour les engrais, les fraudes à la quantité ou à la nature du produit vendu n'ont pas manqué. Une loi du 4 août 1903 réglementa le commerce des produits cupriques anticryptogamiques, obligeant le vendeur à faire connaître la teneur en cuivre ; la loi du 10 mars 1935 étendit cette obligation de faire connaître la teneur en élément utile, à tous les produits utilisés dans la lutte contre les ravageurs[35]. Des circulaires de 1938 et 1939 fixèrent les pratiques de la répression de ces fraudes[36]. Pour certifier l'efficacité du produit, le Centre national de recherche agronomique prêta son concours dès 1923, mais on ne pouvait faire état de ses conclusions, même favorables. Craignant d'être débordés par la demande, les laboratoires de l'État n'acceptèrent d'attester de l'activité des produits que contre le doryphore et seulement après un arrêté du 28 février 1938. Cette vérification de qualité ne fut obtenue par les fabricants qu'avec la loi du 2 novembre 1943 (arrêté d'application du 8 novembre 1943). L'homologation était instituée, avec un contrôle chimique du produit et un essai d'efficacité. Le dispositif ne changea pas lors de la Libération. On remarquera par ces exemples que les périodes de crise et bien entendu de guerre sont des moments d'accélération des procédures de décision, pour deux raisons principales : la protection des vies humaines et la répartition des pénuries. En voici une illustration :

> *Ce sont les événements de guerre qui amenèrent cette création (Le Syndicat professionnel des fabricants de produits anticryptogamiques – 1er juin 1918). Le ravitaillement par mer se faisait en effet tant bien que mal…/… Notre industrie ne jouissait pas alors d'une brillante réputation auprès des Pouvoirs Publics et entretenait avec le service de la répression des fraudes des relations que beaucoup de fabricants auraient souhaité moins étroites, car elles relevaient de la méfiance réciproque beaucoup plus que de la collaboration… Le ministre de l'Agriculture avait, en 1917, résolu de manière arbitraire la répartition des matières premières et laissé libre la distribution des produits fabriqués. Les attributions de sulfate de cuivre avaient été faites dans chaque département par les préfectures et les sympathies personnelles, politiques ou autres avaient eu*

[32] Le mercure interdit dans l'agriculture française y a été introduit par l'Occupant pour la préservation des graines (Ceresan® Bayer = chlorure d'éthylmercure, en vente des années 1920 aux années 1970) (Berton, *op. cit*. p. 78.)

[33] E. Perrot*, Le rôle du pharmacien dans la lutte contre les ennemis des végétaux*, conférence faite au cours des « Journées pharmaceutiques, le 7 juillet 1937 et Berton C., *op. cit.*, pp 55-57

[34] Sur cet aspect, voir l'opinion, de N. Jas, Public health and pesticide regulation in France before and after Silent spring, *History and technology*, vol. 23, n° 4, dec. 2007, p. 372

[35] Berton C., *op. cit.*, p. 77

[36] Par ailleurs, ces substances toxiques étaient d'un usage encadré par les textes : décret du 14 septembre 1916 en application de la loi du 12 juillet précédant qui modifiait la loi du 19 juillet 1845 sur la vente, l'achat et l'emploi des substances vénéneuses.

dans la fixation des tonnages plus de part que les droits industriels précis… Le directeur du service de la répression des fraudes eut alors l'idée de réunir quelques fabricants de bouillie pour examiner avec eux la situation et les mesures qu'elle comportait. Il leur exposa les données du problème et la difficulté pour ses services de trouver une solution sainement motivée en raison de l'absence de structure qui caractérisait notre industrie, éparpillée sur tout le territoire et exercée par des maisons n'ayant entre elles aucun lien corporatif… C'est ainsi que fut décidée la création de notre syndicat…Les principes de la répartition ainsi posés, la distribution (des produits finis) c'est-à-dire la liaison commerciale entre producteurs et usagers resta complètement libre.[37]

Dans les années d'après guerre, un vif espoir est mis dans la chimie de synthèse, laquelle, avec des matières premières françaises et de bas coût permettrait un jour d'échapper à la rançon payée aux étrangers.

Mais la chimie organique, aux multiples et intéressants développements, s'efforce d'intervenir et de nombreux savants prédisent la venue plus ou moins prochaine, sur le marché, de produits organiques de synthèse qui pourront remplacer le soufre, le cuivre… Ce temps n'est cependant, croyons- nous, pas encore arrivé. Il nous permettrait de nous affranchir d'un handicap qui pèse sur notre viticulture.[38]

Chacun sait que les laboratoires ont mis au point, puis sur le marché, un nombre important de molécules ayant le pouvoir de tuer les insectes, les rongeurs, les herbes[39]. Comme pour les engrais, il fallut aux producteurs faire naître une demande. Divers organismes et comités *ad hoc* furent constitués, avec un succès manifeste. Nos manuels comportent des listes, des dates de synthèse, de brevet, de mise en vente et de retrait du marché. Ce n'est pas la place ici de reprendre les étapes de l'utilisation du DDT ou du paraquat, ni du nombre de vies et du nombre de morts qu'on leur doit ou leur impute. Chacune de ces notices apporte sa leçon, cher payée, d'études ou de drames. Tout autant que les pharmacopées humaines et vétérinaires, la phytopharmacie a évolué. Les experts qui se sont penchés sur la balance avantage / risques ont eu à développer des méthodes d'étude et de dosage de plus en plus complexes, élargissant leur curiosité à des aspects que le législateur de 1943 ne pouvait même imaginer. Malgré ces progrès, aujourd'hui, après soixante ans, c'est la procédure d'homologation elle-même et les avis de la Commission d'étude de la toxicité, sa composition, les questions auxquelles elle est tenue de répondre qui nourrissent un débat[40] ; on crie au complot des marchands, au crime de l'étranger. C'est qu'entre temps, la « défense de l'environnement », dont nous allons évoquer l'ancienneté, intéresse davantage l'opinion.

Les craintes pour l'environnement

La nature qui nous entoure nous est hostile mais aussi précieuse. La tension que crée cette contradiction se retrouve à chaque époque. Les traces laissées par l'action de

[37] Berton C., *op. cit.*, p. 83-83
[38] Berton C., *op. cit.,* p. 20
[39] Les herbicides étaient limités à peu de chose avant 1940. Le *Larousse agricole* de 1921 ne connaît pas le mot et à désherbage propose un dessin expliquant comment sarcler. Rien de plus. On utilisa ensuite surtout l'acide sulfurique.
[40] Des livres réquisitoires, vraies pistolétades de points d'exclamation, portent des accusations de collusion permanente et de corruption.

l'homme et celle de ses précautions sont réunies et analysées dans des ouvrages historiques[41]. Bornons nous ici à juxtaposer quelques indications.

Le paysage français a été constamment remanié : le décor de nos vies est une résultante et non une donnée fixe. Il a été plusieurs fois bouleversé[42]. Un exemple en mieux : le couvert forestier est aujourd'hui plus grand qu'il y a quatre siècles[43]. Un exemple en pire : le remembrement a violé le paysage, séparé l'exploitant des souvenirs qui l'attachaient à ses petites parcelles (tel jardin était un héritage, tel pré était une dot, tel champ les économies de toute la vie d'un ancêtre…). Il fallait une promesse de mieux être pour y consentir. Ce bénéfice est absorbé, restent la nostalgie et les regrets. Attendons une génération que le lien affectif se reforme. Car l'agriculteur espère que sa descendance vivra du même terroir, comme lui-même s'imagine vivre là où vécurent ses ancêtres du temps de Louis XIV. Quoique très contraint dans son rôle d'acteur économique, il se sait responsable du patrimoine. La fertilité de son bien lui est une promesse nécessaire.

L'action de l'État : l'Ancien Régime était intervenu pour préserver ce que nous nommons l'hygiène du milieu, pour améliorer la santé publique. Citons pour exemple la vidange des fosses d'aisance et la récupération des boues pour faire des engrais[44]. Il fixa quelques règles de bon sens, de plus liées à des notions de décence, de convenance, d'esthétique. La Révolution a balayé ces deniers impératifs. Le pays ne voulait plus entendre parler de quelque frein que ce fût à l'activité et aux initiatives des particuliers. Cette liberté d'agir est un des socles du libéralisme économique issu des Lumières. La première entrave vint de la loi de 1810 sur les établissements insalubres. En fait, elle permit de cantonner les plaintes des riverains contre les désagréments, nous dirions les nuisances ou la pollution, issus des ateliers[45]. Le monde agricole aussi suscita des plaintes, (cas du rouissage du lin, troublant les eaux de lavage et sentant mauvais)[46]. Après 1850, pour divers motifs, le dogme libéral fut contourné ; la loi d'hygiène publique

---

[41] P. Matagne, Aux origines de l'écologie, *Innovations, Cahiers d'économie de l'innovation*, n° 18, 2003, pp 27-42 ; Acot P., *Histoire de l'écologie*, PUF ed., Paris, 1988

[42] C. Beck et R. Delort (sd), Pour une histoire de l'environnement, travaux du programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement, CNRS ed., 1993, 271 p.

[43] La forêt est un élément très variable de l'écosystème français. À moins de 15 % du territoire après les guerres de religion, on passe grâce à Colbert et son Ordonnance de 1669 à 25 % ; au XVIII^{e} siècle, sous l'influence des physiocrates qui voient dans les produits de la terre la seule richesse, le défrichement reprend, et avec lui la dégradation des taillis et futaies. La Révolution est le pire moment des forêts des domaines. La gestion rigoureuse voulue par Napoléon tarde à porter de bons résultats, d'autant que la Restauration a de grosses difficultés de trésorerie et que les coupes de bois, jusqu'à la Grande Guerre, sont pour l'État une recette de poche facile à réaliser. Le code forestier de 1827 permet un reboisement de qualité. Depuis cinquante ans, les meilleurs rendements agricoles amènent à l'abandon de l'agriculture et des labours sur les parcelles en pente, les zones inondables, difficiles. La forêt y revient ou y est replantée. Les feuillus que les besoins de la marine et de la construction avaient fait préférer pendant des siècles, sont concurrencés par les résineux. Le couvert forestier est aujourd'hui autour de 16 millions d'hectares, soit près de 29 % de notre territoire, plus que sous Louis XIV. Ce mode d'occupation des sols que l'on croit naturel, voire originel quand on est vraiment naïf, ne l'est pas ; ses progrès sont l'indice de l'attention des Français à la préservation de leur pays. Nos voisins ont en moyenne des surfaces entre 7 et 10 %. A. Poitrineau, article [eaux et forêts], Dictionnaire du Grand siècle, sd F. Bluche, Fayard ed., Paris, 1990 ; J. Tulard, article [Forêts], Dictionnaire Napoléon, sd J. Tulard, Fayard ed., Paris, 1987 ; J.-R. Pitte, Histoire du paysage français, Tallandier ed., Paris, 1983 pp 84-88, 133-134.

[44] Saddy P., Le cycle des immondices, *Dix-huitième siècle*, tome IX, 1977, pp 203-214 ; E. Gardiès, Hygiène et salubrité publique à Toulouse (1789 – 1848), 2^{e} partie : Les réalisations toulousaines, *Bulletin du Centre d'étude d'histoire de la médecine*, n° 61, juillet 2007, p. 51 ; J. Monteil, Un procès de pollution industrielle à Montpellier en 1791, *Histoire des sciences médicales*, 8, 1974, p 825-827

[45] par exemple, F. Farge, *Le voisinage industriel*, thèse de droit, Grenoble, 1923, 130 p.

[46] Parent-Duchatelet A., Le rouissage du chanvre considéré sous le rapport de l'hygiène publique, *Annales d'hygiène publique et de médecine légale*, VII, 1832, p. 237 -339

de 1902 marque le déclin définitif de son primat dans ces matières[47]. La libre entreprise oui, mais dorénavant dans des limites plus étroites que celle de ne pas gêner ses proches voisins. L'idéal d'un « respect de la nature » avait retrouvé une place dans les programmes de la chose publique, par le détour de la salubrité des eaux de boisson et des maladies contagieuses. Mais attention, il ne faut pas désespérer l'initiative, créer un sentiment d'interdit général.

Les épisodes de pollution aiguë n'ont pas manqué et ont frappé les esprits. La liste est longue des catastrophes dues à l'activité des hommes. Encore ne gardons-nous que le souvenir de ce qui a eu lieu à l'époque historique. L'Occidental, parce que plus entreprenant durant les derniers siècles a un bilan plus lourd que les autres mais rien ne dit que la survie et la prospérité des autres peuples ont été obtenues sans influence délétère sur leur milieu ; on cite des espèces animales disparues bien avant notre passage. Notre civilisation préindustrielle aussi a fait des fautes[48]. L'inventaire des schémas de pollutions accidentelles a été fait depuis bien longtemps[49]. Les enseignements à tirer de nos choix et des excès dans ces choix ne sont pas perdus ; leur analyse retient tous les soins des spécialistes[50]. Ils doivent être écoutés.

La peur d'une pollution chronique, d'un empoisonnement par la nourriture est un thème obsédant du journalisme actuel. La recherche scientifique la traque ; mais ces travaux font des détours par des analyses mathématiques si savantes, par l'observation d'espèces animales ou végétales si particulières et qui semblent si exotiques que leur valeur probante n'est pas évaluable par un lecteur novice.

L'écologie est une science qui occupe les écologues ; l'écologisme est un mouvement politique. La science a des fondements plus que centenaires ; le mouvement politique est tout récent, né de la rencontre d'opinions généreuses et d'hommes déçus par d'autres combats. Les arguments d'inquiétude des uns et des autres ont des ressemblances mais le ton des argumentaires différent tout comme l'urgence des décisions demandées. Les premiers vivent dans le temps long et suspendu de l'étude ; les seconds veulent en découdre. Les uns présentent leurs résultats ; les autres les agitent. Chacun a son mérite. Sans doute le discours historique retiendra-t-il des césures assez artificielles dans le continuum de l'opinion publique : 1963 et le livre *Printemps silencieux* et 1992, le principe de précaution, inscrit dans la Convention de Rio. Souhaitons qu'une autre date prochaine ne s'impose pas, marquant quelque affreuse découverte que nous n'aurions su anticiper.

De ce court repérage, que retenir ?

- que nous quittons une phase d'activisme enthousiaste pour entrer dans un temps de redéfinition de nos buts, sachant que le pays porte vingt millions d'habitants de plus qu'en 1940 et la planète quatre milliards.

- que l'agriculture française et notre autosuffisance alimentaire ont valeur stratégique. On peut douter que la France se risque à une aventure, fût-elle vertueuse.

---

[47] M. Romier, *Pollution et libéralisme à Grenoble au XIX^e siècle*, Thèse de droit, Grenoble, 1997, 492 p., *passim*

[48] Explosions de poudreries, déforestation pour les besoins de la Marine, esclavage antique et des Temps Modernes, exterminations des animaux sauvages, etc.

[49] par exemple : E. C. Halliday, *Historique de la pollution atmosphérique*, in *La pollution de l'air*, série de monographies de l'OMS, n° 46, Genève, 1963, pp 9-38

[50] par exemple : F. Ramade, *Les catastrophes écologiques*, McGraw-Hiil ed., Paris, 1987, 318 p. ; *Introduction à l'écotoxicologie, fondements et applications*, Tec et Doc Lavoisier ed., Paris, 2007, 618 p.

- que le monde agricole a été lent à se moderniser, ce qui laisse penser qu'il ne modifiera aussi que lentement sa pratique actuelle. Il se laisserait convaincre si on lui apportait une recette de remplacement immédiat, de profit au moins équivalent pour assurer la pérennité de son exploitation.

- qu'il n'est pas de débat scientifique sain qui s'appuie sur l'invective permanente.

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle, sous le regard du citoyen

Pr Jean-François CAILLARD

Service de médecine du travail et pathologie professionnelle, CHU Charles Nicolle, Rouen

1. L'environnement et la santé: une problématique émergeante

La relation entre la santé, définie comme un état d'équilibre bio-psycho-social de l'individu, avec adaptation permanente à l'environnement et aux conditions de travail (René Dubos) et l'environnement - ensemble des éléments naturels et artificiels qui entourent un individu humain, animal ou végétal ou une espèce » (Larousse) - tend à devenir aujourd'hui une préoccupation majeure, inscrite à la fois dans l'évolution même des systèmes de santé et dans la logique du développement durable.

Elle interpelle toutes les composantes de la société, société dans laquelle chaque citoyen est à la fois une victime potentielle d'un environnement susceptible d'être nocif, et acteur de la constitution même de cet environnement : l'environnement naturel a progressivement laissé place à un environnement très largement façonné par l'activité humaine, le changement climatique en étant aujourd'hui une expression particulièrement significative.

Dans son introduction, le premier plan national santé environnement français, paru en juin 2004, lançait une alerte et un appel à l'action en établissant un certain nombre de constats:

- de l'ordre de 30 000 décès anticipés par an sont liés à la pollution atmosphérique urbaine,
- un doublement de la prévalence des maladies allergiques respiratoires est enregistré depuis 20 ans,
- seules 37 % des ressources en eau potable disposent aujourd'hui de périmètres de protection,
- la qualité de l'eau dans le milieu naturel se dégrade de manière continue,
- 14 % des couples consultent pour des difficultés à concevoir, lesquelles difficultés pourraient être liées à des expositions à des substances toxiques pour la reproduction,
- 7 à 20 % des cancers seraient imputables à des facteurs environnementaux,
- près d'un million de travailleurs seraient exposés à des substances cancérogènes,
- l'évaluation des risques liés aux substances chimiques est insuffisante, les capacités d'expertise française trop peu développées,
- les risques liés aux expositions dans les locaux sont mal connus alors que la population y séjourne environ 80 % de son temps,
- la recherche, l'expertise, la formation et l'information en matière de santé environnement sont très insuffisamment développées.

La médecine et les médecins occupent une place à part dans un tel contexte et ces derniers se voient interrogés et appelés à donner des réponses à leurs patients de plus en plus inquiets de menaces qu'ils perçoivent à travers des circuits d'information divers, ou à l'occasion de crises sanitaires retentissantes, alors même que l'espérance de vie et l'état de santé globale de la population ne cessent de s'améliorer, cependant au prix d'inégalités flagrantes, notamment en France, selon les catégories de population.

2. Un corpus de connaissances en évolution permanente

2.1. La production de connaissance

L'établissement d'une relation entre l'apparition d'un phénomène pathologique et l'exposition à un facteur environnemental est un processus long et extrêmement complexe, notamment du fait des niveaux habituellement faibles des expositions et du caractère multifactoriel des phénomènes morbides observés. Les certitudes sont peu nombreuses et l'incertitude est la règle, comme en témoignent, sur grand nombre de

sujets, les études et points de vue contradictoires, souvent amplifiés par les attitudes des différentes parties prenantes, plus ou moins soumises elles-mêmes à des conflits d'intérêt.

Mais, parce que la santé environnementale concerne la totalité de la population, et parce que le temps nécessaire, lorsqu'une intervention sur un facteur de risque environnemental est décidée, la visibilité de son résultat est long, souvent de l'ordre de plusieurs décennies, les conséquences de l'ignorance peuvent être dramatiques.

Outre les techniques de mesurage des facteurs environnementaux, cette connaissance résulte des apports de multiples disciplines (clinique médicale, toxicologie expérimentale, biologie moléculaire, génétique, épidémiologie – statistiques…), afin de permettre de caractériser les risques et de calculer leur fraction attribuable dans l'apparition des phénomènes pathologiques, ce qui constitue le fondement de l'action publique, laquelle doit aussi intégrer les apports des sciences humaines et sociales, et, de plus en plus, du droit et de l'économie.

Seul un intense effort de recherche interdisciplinaire, international et indépendant est à même de guider l'action des Etats, de faire du principe de précaution non pas une source d'immobilisme mais un facteur d'accélération de la décision.

2.2. Les grandes questions de santé environnementale

Le rapport de la Commission d'orientation du PNSE avait été, début 2004, l'occasion de dresser un bilan de l'état des connaissances en France, de poser un certain nombre de principes et de définir des priorités, basées sur l'importance sanitaire des effets ou des dommages observés, l'exposition de la population, les actions devant et pouvant être entreprises, le besoin de connaissance et le degré d'incertitude scientifique.

Le champ était limité aux seuls effets sur la santé humaine des agents physiques, chimiques et biologiques présents dans les milieux, et excluait les catastrophes naturelles, les actes de terrorisme chimique et biologique, les accidents quels qu'ils soient.

Le principe du cumul des expositions de chacun tout au long de sa vie, dans les différents milieux fréquentés (environnement général, habitat, milieu de travail, transports et lieux de loisirs, environnements particuliers…) était posé, et le souci permanent des populations sensibles et défavorisées affiché.

Huit thématiques sanitaires prioritaires, six recommandations générales et une centaine de recommandations particulières étaient ainsi définies.

Le travail de la Commission d'évaluation (CODEV), à mi-parcours du PNSE, publié en juillet 2007, a montré que, dans l'ensemble, ce plan, défini et mis en œuvre par la puissance publique, était conforme aux travaux de la commission et qu'il devait impérativement être pérennisé, ce qui sera le cas puisqu'un second plan, intégrant les résultats du Grenelle de l'environnement, est en cours de préparation.

La continuité et l'actualisation de ces PNSE permettent ainsi d'identifier un certain nombre de thématiques essentielles, dont certaines font ou pourront faire l'objet de plans particuliers.

2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail

- Les substances chimiques et notamment celles qui sont cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction, incluant les perturbateurs endocriniens, dans les différents milieux où l'exposition humaine est possible.
- Les agents physiques notamment les rayonnements (ultra-violets, ionisants, électromagnétiques), le bruit.
- Les agents biologiques.
- La qualité de l'air extérieur et intérieur.
- La qualité de l'eau et des sols
- L'habitat insalubre
- Les effets du changement climatique sur les écosystèmes et leur conséquences en terme d'évolution des maladies mettant en cause des agents biologiques et infectieux.
- Les transports (éventualité d'un plan "santé-transports").
- Les nouvelles technologies notamment les biotechnologies et les nanotechnologies.
-

2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement

- Cancers.
- Maladies respiratoires, cardiovasculaires et allergiques en lien avec la pollution atmosphérique extérieure et intérieure.
- Maladies infectieuses, notamment maladies émergentes.
- Troubles de la reproduction.
- Maladies du système nerveux.

2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables

- Enfants et femmes enceintes
- Populations cumulant plusieurs expositions environnementales dangereuses.

3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle

3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé

« L'hygiène du milieu et hygiène industrielle sont sources des plus grand progrès de l'histoire de l'humanité en matière de santé publique » écrivait D. Zmirou dans l'introduction au rapport de la Commission d'orientation du PNSE.

En France, c'est la loi d'orientation de santé publique de 2004 qui, en adoptant une logique de planification, a fait de la santé dans l'environnement une priorité nationale, sans oublier la mise sur un même plan de la santé au travail (le plan santé-travail est une conséquence du PNSE) et en a fait un élément essentiel de la politique de santé publique.

C'est sans doute au plan régional que les effets de cette politique sont les plus perceptibles. Les Groupements régionaux de santé publique, les Conférences régionales de santé, les PRSE et PRST ont eu le mérite, pour la première fois, d'institutionnaliser une concertation entre les représentants de toutes les administrations concernées, et à des degrés divers selon les régions, d'encourager la participation des autres parties

prenantes (patrons, syndicats, associations, institutions diverses…) à une réflexion collective visant à définir des priorités régionales de santé qui aillent au-delà des questions usuelles de l'accès aux soins et de l'organisation des établissements dévolus à la prise en charge des malades.

Un très grand nombre de maladies sont influencées par l'environnement, tel que défini plus haut. Si l'on admet qu'au-delà de ce champ volontairement restreint (risques physiques, chimiques et biologiques), il y a lieu d'inclure les questions liées à l'organisation de la société (urbanisation, organisation des transports, modes de consommation …) et celles liées aux comportement individuels et collectifs, c'est alors tout le champ de la santé publique qui se trouve impacté par la question de l'environnement ; c'est aussi la mise en évidence de la nécessité d'inverser le paradigme de la politique de santé en faisant de la prévention des risques et de la promotion de la santé la priorité absolue.

3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale

3.2.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint

La connaissance approfondie des relations entre les expositions environnementales et la santé repose exclusivement sur une appréhension collective des phénomènes, même si, à une époque où les expositions étaient massives et les effets clairement identifiables (ce qui fut le cas de nombre de pathologies professionnelles), c'est à partir d'observations individuelles (MCV-Choléra-…) que se sont identifiées des problématiques que l'expérimentation et l'épidémiologie ont pu ensuite préciser. Aujourd'hui, le dispositif de veille sanitaire inclut aussi ce type d'approche, tandis que l'analyse des catastrophes et accidents environnementaux reproduit le schéma d'exposition aigues massives.

Sous un autre regard, l'imputation à un facteur environnemental d'une maladie donnée chez une personne donnée ne se prête que relativement rarement à la possibilité d'affirmer l'existence d'un lien de causalité. Même en matière de maladies professionnelles, où la connaissance des expositions est *a priori* beaucoup plus accessible, le problème se trouve aussi posé de plus en plus souvent, du fait notamment de la diminution des niveaux d'exposition.

L'exemple du cancer du sein est particulièrement démonstratif de cet état de choses, dans lequel un grand nombre de facteurs de risques sont connus (génétique : mutations gènes BRCA1 ou 2, âge des premières règles, fréquence des grossesses, traitement hormonal (contraceptif − substitutif), tabagisme actif/passif et certains facteurs nutritifs..) mais où la question émergente du rôle de certaines substances chimiques (dont des pesticides) et celle de l'exposition au travail de nuit pourrait amener à en imputer la survenue à tel ou tel facteur professionnel ou environnemental.

Ceci est d'autant plus important que la recherche d'une cause à la maladie dont on est atteint, sans même en étendre la portée aux bénéfices secondaires qu'on peut attendre d'une telle information, est une démarche aussi naturelle qu'elle apparaît essentielle.

Ceci pose un problème fondamental qui ne peut être résolu par la connaissance objective, mais seulement par la décision, qui relève de l'état ou des organismes sociaux, de définir des critères d'imputabilité qui tentent de réduire au maximum la marge d'improbabilité, ou par le rapport de force inscrit au cours d'une action judiciaire.

C'est à ce stade que la question évoquée plus haut de l'incertitude, voire des controverses scientifiques sur la réalité des liens entre certaines maladies (notamment celles de survenue tardive après l'exposition) et l'environnement se pose avec force : la parution récente du rapport de l'Académie des sciences et de l'Académie de médecine sur les causes du cancer en est l'illustration.

3.2.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé

C'est une autre façon d'envisager la relation entre environnement et santé individuelle. Chaque personne est, dans une certaine mesure, responsable de sa propre santé, une fois éliminés certains déterminants génétiques. Cette responsabilité s'exerce essentiellement par le comportement personnel ou celui de l'environnement relationnel proche. Celui-ci est dicté entre autre par la perception que chacun a de la réalité des risques qu'il court, et de la possibilité d'exercer un contrôle sur eux.

L'expérience quotidienne que peuvent avoir les médecins montre qu'il n'y a pas de superposition obligatoire entre la perception d'un risque et sa réalité ("le bruit, c'est ce que font les autres …").

Qui plus est, si les médias s'acharnent à décrire les risques innombrables auxquels chacun est exposé dans sa vie quotidienne, il reste difficile pour chacun, et même parfois pour les spécialistes, de faire la part entre risques avérés, risques supposés, parmi lesquels la part des risques émergents mérite une attention particulière.

Différents modèles explicatifs de la perception des risques coexistent, décrivant des approches transactionnelle (Ittelson), psychométrique (Slovic), culturelle (Douglas, Thomson) et constructiviste (Earle, Kasperson, Pages). Ils sont succinctement décrits dans la dernière édition de Baromètre Santé de l'Inpes (p 31-32).

Selon son niveau de perception des risques, chaque personne pourra s'attacher à développer un ensemble d'actions visant à en conjurer les effets, sous l'effet de telle ou telle incitation. Ceci constitue la base de la promotion de la santé, enjeu essentiel dans les sociétés développées où la loi des rendements décroissants limitera dans l'avenir le recours aux soins curatifs comme unique réponse à la survenue des maladies.

La prise de conscience des enjeux sanitaires de l'environnement est sans doute un phénomène nouveau et durable, susceptible, outre d'atteindre des objectifs de santé individuelle choisis, de contribuer à une adhésion collective aux objectifs d'amélioration de l'environnement par des changements de comportement ou par tous types d'actions de groupes (cf les associations militantes spécialisées). En milieu professionnel, le mouvement de la "Clinique médicale du travail", qui rassemble un nombre croissant de médecins du travail, peut être mis en parallèle.

4. Le regard du citoyen

"Chaque individu a droit à un environnement compatible avec le niveau de santé et de bien-être le plus élevé possible, à l'information sur l'état de l'environnement et sur les programmes, décisions et activités susceptibles d'agir sur l'environnement et sur la santé, et à participer au processus de prise de décisions".

Cet extrait de la charte européenne sur l'environnement et la santé pose la participation du citoyen comme principe intangible. En même temps, il répond à des besoins nouveaux, dans les sociétés avancées, qui résultent de l'élévation du niveau global d'éducation et d'information, du besoin accru de liberté, mais aussi de la méfiance, voire de la perte de confiance à l'égard de ceux qui, décideurs publics ou privés, experts

ou professionnels chargés de la protection sanitaire, n'ont pas su ou pas pu prévenir les crises sanitaires de ces dernières années.

Cette participation pose la question essentielle de l'accès à une information fiable, compréhensible, proche du terrain, sans cesse actualisée, incluant les dimensions juridiques et économiques, et dont l'un des enjeux majeurs est de tenter de faire comprendre la réalité de l'incertitude scientifique. Elle pose aussi celle des conditions de l'expertise en matière de santé-environnement, partant, de la formation et de la recherche.

Mais la base fondamentale de cette construction réside aussi dans la mise en œuvre de systèmes d'évaluation des risques, d'enregistrement des données sanitaires et de mise en lien de ces informations.

De nombreuses recommandations ont été inscrites sur ces sujets dans le Plan National Santé Environnement (PNSE) et seront renforcées dans le plan suivant ; mais un très important retard est à combler, ce d'autant que la France se singularise encore par un niveau élevé d'inégalités sociales et environnementales de santé.

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen.

JF Caillard

Institut national de Médecine agricole
19 septembre 2008

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

Le champ de la santé environnementale

- Environnement
- « Ensemble des éléments naturels et artificiels qui entourent un individu humain, animal ou végétal ou une espèce » (Larousse)

« Tout ce qui n'est pas génétique est environnement »

- Santé
- « État d'équilibre bio-psycho-social de l'individu, avec adaptation permanente à l'environnement et aux conditions de travail » (René Dubos)

PNSE 2004-2009: le corps médical interpellé

•30 000 décès anticipés/an liés à la pollution atmosphérique urbaine
•doublement de la prévalence des maladies allergiques respiratoires depuis 20 ans
•Seules 37 % des ressources en eau potable disposent aujourd'hui de périmètres de protection
•la qualité de l'eau dans le milieu naturel se dégrade de manière continue
•14 % des couples consultent pour des difficultés à concevoir (rôle possible des expositions à des substances toxiques pour la reproduction
•7 à 20 % des cancers seraient imputables à des facteurs environnementaux

- près d'un million de travailleurs exposés à des substances cancérogènes
- évaluation des risques liés aux substances chimiques insuffisante,
- capacités d'expertise française trop peu développées
- risques liés aux expositions dans les locaux mal connus alors que la population y séjourne environ 80% de son temps
- recherche, expertise, formation et information en santé environnement insuffisamment développées.

Le corps médical interpellé

Médecins généralistes/spécialistes (pédiatres/gynécologues, neurologues …)

Médecins du travail /Médecins de santé publique

En lien avec

d'autres professionnels

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

La question de la connaissance

- Au cours de l'histoire, des effets sévères et des expositions fortes
- La survenue d'accidents de pollution
- La période moderne
- L'apport de l'observation en milieu de travail

BERNARDINO RAMAZZINI
De Morbis Artificum Diatriba
1700

BERNARDINI RAMAZZINI – De Morbis Artificum Diatriba. 1700.

Trois découvertes majeures en pathologie environnementale

- 1775: Percival Pott: Cancer professionnel
- 1854: Snow découvre le rôle de l'eau dans la transmission du choléra
- 1883: Robert Koch: Vibrio Cholerae
- Années 1950: R. Doll: le rôle cancérogène du tabac

La connaissance des effets de la pollution atmosphérique

- Smoke + Fog = SMOG
- 1930: Vallée de la Meuse en Belgique:
  - 60 décès attribués en 2 jours de décembre
- 1948: Donora, Pensylvanie
- 1952: Londres: 4000 décès en 2 semaines.

La connaissance des effets de la pollution des eaux

- Mina-Mata
  - pollution par déversement de centaines de tonnes de mercure par une usine entre 1932 et 1966 dans la mer de Shiranui (Japon). 20 à 30 000 malades (13265 avaient été indemnisées en 1995 – 19 000 autre sont déposé des demandes)
- Itaï-Itaï:
  - Pollution par déversement de cadmium dans une rivière. Contamination de la chaîne alimentaire. Nombreuses victimes de maladies rénales et osseuses

Les effets des accidents industriels

- * Seveso
- *Bhopal
- *Tchernobyl
- *Toulouse

La question de la connaissance

- L'établissement d'une relation entre l'apparition d'un phénomène pathologique et l'exposition à un facteur environnemental est un processus long et extrêmement complexe, du fait des niveaux habituellement faibles de l'exposition et du caractère multifactoriel des maladies
- Les certitudes sont peu nombreuses – l'incertitude est la règle
- Les études et points de vue contradictoires sont fréquemment observés
- Les conséquences de l'ignorance peuvent être dramatiques

L'évaluation du risque

- C 'est « un processus systématique pour décrire et quantifier les risques associés aux substances, processus, actions ou évènements dangereux ».
- (V.T. Corvello et M.W. Merkhofer (Risk Assessment Methods. Plenum Publishing Corporation. New-York, l993),

Pour le Robert

Danger : ce qui menace ou compromet la sûreté, l 'existence,
(nuisance) d 'une personne ou d 'une chose.

Risque : danger éventuel plus ou moins prévisible

En Cyndinique

Danger : tendance d 'un système à engendrer
un ou plusieurs accidents :
Probabilité / Gravité

Risque : mesure la probabilité (mathématiques)
et la gravité.

Le risque est la mesure du danger.

L'évaluation du risque sanitaire environnemental

- Plusieurs étapes pour aller de l'identification de la dangerosité potentielle d'une facteur de l'environnement à la relation entre la dose et l'effet puis à la réalité de l'effet sur les personnes qui y sont exposées.

L'évaluation du risque sanitaire environnemental

- Mobilisation de plusieurs disciplines scientifiques:
  - Clinique médicale
  - Toxicologie expérimentale
  - Épidémiologie – statistiques

L'exemple du chlorure de vinyle (années 70)

- Connaissance des effets micro-vasculaires et osseux chez les ouvriers exposés
- Expérimentation animale: découverte du rôle cancérogène
- Apparition de cas isolés d'une nouvelle forme de cancer du foie chez des ouvriers de l'industrie chimiques
- Programmes d'enquêtes épidémiologiques dans les grands pays
- Confirmation du rôle de l'exposition professionnelle et définition de normes d'exposition
- Protestations de l'industrie chimique

L'évaluation du risque sanitaire environnemental aujourd'hui

- Mobilisation de plusieurs disciplines scientifiques et techniques et croisement des approches:
- Coût élevé des études – délai long des enquêtes
  - Techniques de mesures des expositions
  - Clinique médicale
  - Toxicologie expérimentale
  - Biologie moléculaire
  - Génétique
  - Épidémiologie – statistiques
  - Géographie – sociologie – psychologie…

L'évaluation du risque environnemental

- …Pour permettre de caractériser un risque et de calculer sa fraction attribuable dans l'observation d'une phénomène pathologique.
- La fraction (ou proportion) attribuable est la fraction de tous les cas d'une maladie (parmi les exposés et les non exposés) qui sont dus au facteur concerné, ou en d'autres termes la proportion qui aurait été évitée si le facteur n'était pas présent
- Lorsqu'on a pu établir la fraction attribuable du risque, la connaissance du nombre total de cas de la maladie dans l'ensemble de la population permet de calculer le nombre de cas imputables au facteur considéré, par simple multiplication de la fraction attribuable du risque par le nombre total de cas de la maladie .À partir de ce modèle simple, il est également possible de calculer, pour une même maladie, la fraction attribuable à plusieurs risques.

Calcul de la fraction de risque attribuable

- FRA = P (RR - 1) / [P (RR - 1) + 1], où P est la proportion de sujets exposés au facteur de risque dans la population, et RR le risque relatif
- RR = R1 / Ro , où R1 est le risque de faire la maladie chez les personnes exposées et Ro le risque de maladie chez les sujets non exposés.

La question de la connaissance

- Niveau faibles des risques relatifs et des fractions attribuables
- Résultats contradictoires
- Points de vue contrastés
- Amplification médiatique

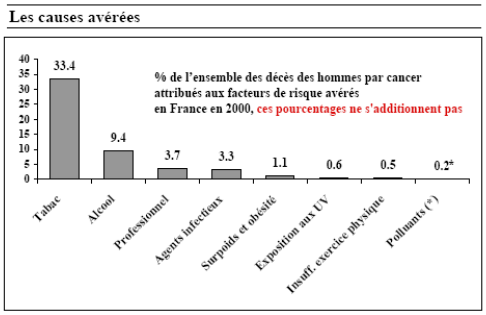
Le cas du cancer

- Données de la littérature mondiale reprises dans le rapport de la CO du PNSE : 7-20%: facteurs environnementaux (hors comportements individuels):
  - professionnels: 4 à 8,5%
  - contaminants environnementaux alimentaires: <1% -
  - contaminants dans l'air, l'eau et les sols: 1à5%
  - facteurs géophysiques (RI – UV): 2 à 4%
  - produits industriels de consommation:1 à 2%

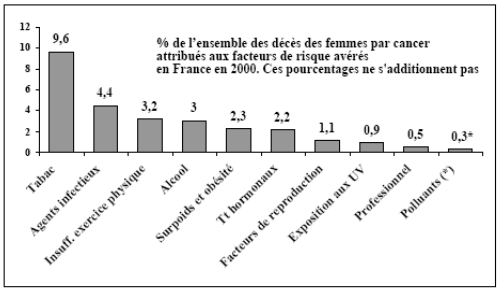
Le cas du cancer

- Rapport des Académies nationales de médecine et des sciences sur les causes du cancer en France (13 09 07)
- «En tenant compte de l'augmentation et du vieillissement de la population , la mortalité par cancer chez les femmes a diminué de 24% depuis 1950. Chez les hommes elle a augmenté de 47% de 1950 à 1985 à cause du tabagisme et de l'alcoolisme puis a diminué depuis de 21% depuis grâce à la lutte contre ces addictions.
- Globalement, la mortalité par cancer a diminué d'environ 13% entre 1968 et 2002, et non pas augmenté comme on le croit souvent ».
- L'accroissement de l'incidence de certains cancers depuis 1980 est dû, pour la plus grande part, au perfectionnement des méthodes diagnostiques et au dépistage.
- .

Rapport des Académies



Rapport des Académies



(*) Si on prenait en compte certaines études, encore discutées, sur la pollution atmosphérique, le pourcentage de l'ensemble des décès par cancer liés à la pollution pourrait atteindre 1% pour les hommes et 0,4 % pour les femmes

Rapport des Académies

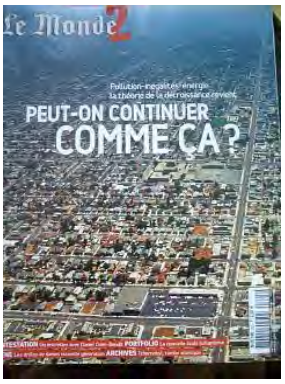
- Préconise d'agir prioritairement sur les facteurs de risque connus et de développer la recherche

Rapport des Académies

- Mais ce rapport (Salines et Coll, Invs, RESP (55) 2007 423-424:
- ne prend en compte que les données avérées (Crgn Grpe 1 du CIRC – niveaux d'exposition de la population connus) et pas les nombreuses autres situations (Grpe 2A-B ou niveaux d'exposition mal connus)
- calcule à partir d'hypothèses basses conduisant aux estimations les plus faibles
- abouti à ce que seuls 35% des cancers sont expliqués et que l'incertitude scientifique et ses conséquences en terme de précaution ne sont pas discutées

Le Monde 27 avril 2006

- Pr JP Camilleri, Dir Hon section médicale Inst.Curie
- Le croisement des courbes de mortalité par cancer BP entre H et F s'explique plus par les habitudes tabagiques que par la pollution atmosphérique
- L'espérance de vie augmente de 3 mois par an en France
- Où sont les preuves scientifiques pour affirmer que la pollution chimique constitue une menace grave pour la survie de l'homme et que le développement de nombreuses maladies actuelles est consécutif à la dégradation de l'environnement?.
- H. Pézerat, Dir Rech Honor au CNRS
- L'action des pouvoirs publics et du corps médical vise à cibler essentiellement le tabagisme à l'origine de la progression d'un certain nombre de cancers
- Très peu d'efforts sont faits pour expliquer pourquoi les cancers du sein incidents sont passés de 21200 à 41800 entre 1980 et 2000
- Domaine où toutes les recherches – dans les institutions publiques et privées - sont sous étroite surveillance du lobby international de la chimie.



Le point de vue d'un immunologiste (JF Bach)

- Génétique: combinaison de gènes – rôle exceptionnellement exclusif
- Rôle indiscutable de l'environnement, mais par quel mécanisme et dans quelle mesure
- Les maladies immunitaires pourraient être dues à une diminution des infections auxquelles la population est exposé (cf arguments immunologique et d'épidémiologie géographique

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

Les grandes questions de santé environnementale en terme de
risques et de milieux

- Les substances chimiques et notamment celles qui sont cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction, incluant les perturbateurs endocriniens, dans les différents milieux où l'exposition humaine est possible.
- Les agents physiques notamment les rayonnements (ultra-violets, ionisants, électromagnétiques), le bruit.
- Les agents biologiques.

Les grandes questions de santé environnementale en terme de
risques et de milieux

- La qualité de l'air extérieur et intérieur.
- La qualité de l'eau et des sols
- L'habitat insalubre
- Les effets du changement climatique sur les écosystèmes et leur conséquences en terme d'évolution des maladies mettant en cause des agents biologiques et infectieux.
- Les transports (éventualité d'un plan "santé-transports").
- Les nouvelles technologies notamment les biotechnologies et les nanotechnologies.

Les grandes questions de santé environnementale en terme de maladies

- Cancers
- Maladies respiratoires, cardiovasculaires et allergiques en lien avec la pollution atmosphérique extérieure et intérieure.
- Maladies neuro-dégénératives
- Troubles de la reproduction
- Maladies infectieuses émergeantes

Les grandes questions de santé environnementale en terme de populations sensibles et vulnérables

- Enfants et femmes enceintes
- Populations cumulant plusieurs expositions environnementales dangereuses
- « Points noirs environnementaux »

Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

La genèse du fonctionnement de la politique de santé publique par programme

- * La loi organique sur les lois de finance (LOLF), fait évoluer l'action publique et ses applications dans le domaine privé vers un fonctionnement basé sur la réalisation d'objectifs et non plus sur une simple mobilisation de moyens détachés de leurs finalités.
-
- * La loi d'orientation de santé publique (2 Août 2004) comporte des objectifs en santé-environnement-travail et crée une dynamique nationale et régionale

SANTE ET ENVIRONNEMENT

Objectif général

Il se décline en quatre grandes sections, par ordre décroissant d'impact sur la santé publique. On notera que nombre de situations à risques ou agents qui font l'objet de préoccupations de la part du public (ex : produits chimiques, incinérateurs, sols pollués, téléphones portables etc.) ne sont pas abordées ici : les connaissances sont insuffisantes (lien causal non établi, données sur la relation dose-effet, données d'exposition) pour en estimer l'impact donc leur assigner un rang de priorité.

- **Pollution atmosphérique urbaine : Réduire de 30% les concentrations moyennes en particules fines et ultrafines et en NO_x dans l'air ambiant des villes, par rapport aux niveaux mesurés en 2002 par les réseaux de mesure de la qualité de l'air (la mesure des particules ultrafines doit être généralisée).**
- **Habitat : réduire de 10 % la concentration moyenne de radon dans les habitations par rapport au niveau estimé en 2002 par l' Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (65 Bq/m³) ; ramener les concentrations de radon dans les 10 000 logements où elles sont les plus élevées en deçà de 400 Bq/m³ (valeur guide de l'UE) ; réduire de 30% la mortalité par intoxication par le monoxyde de carbone (CO) (l'estimation actuelle de 150 à 300 décès par an doit être précisée pour tenir compte des intoxications méconnues et de la sous-déclaration) ; réduire de 50% la prévalence des enfants ayant une plombémie > 100µg/l : passer de 2% en 1999 à 1% en 2008 ; réduire la plombémie moyenne de la population.**
- **Bruit : réduire de 25% les niveaux de bruit entraînant des nuisances sonores quelles que soient leurs sources (trafic routier, voisinage, musique amplifiée) par rapport aux niveaux mesurés en 2002 par diverses institutions (Ministère de l'Ecologie, INRETS).**
- **Qualité de l'eau : réduire de 50% l'incidence des légionelloses (les estimations devront être précisées pour tenir compte de la fréquence des cas méconnus et de la sous-déclaration) ; fournir une eau conforme à la réglementation en matière microbienne et de contamination par les polluants organiques et minéraux à 100% de la population raccordée au réseau public d'ici 2008 (actuellement 92%).**

RISQUES PROFESSIONNELS

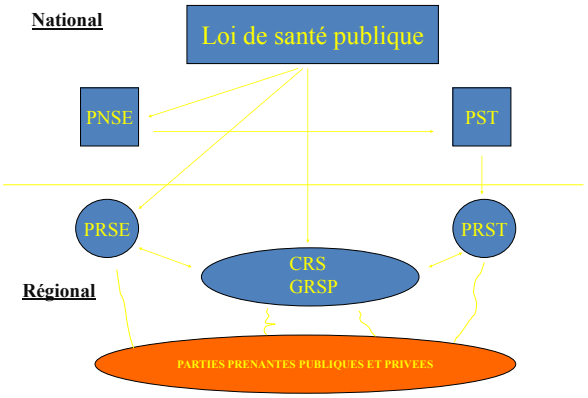
Objectif général

- **Prévenir les maladies professionnelles**
  - **Prévenir l'exposition :**

    Faire baisser de 20 % à l'horizon 2007, dans tous les secteurs, par rapport aux résultats qui seront obtenus en 2003 par l'enquête SUMER en cours, le nombre de salariés soumis à des contraintes physiques (contraintes articulaires répétitives plus de 20 heures par semaines ; bruit de plus de 85 db sans protection auditive ; manutention manuelle de charge plus de 20 heures par semaine), le nombre de salariés exposés à des agents biologiques des groupes 3 et 4 ou à des agents cancérogènes de catégorie 1 plus de deux heures par semaine (prioritairement : huiles minérales (HAP), poussières de bois, benzène, silice cristalline, goudrons, Chrome VI, Nickel, Cadmium, Chlorure de Vinyle, Arsenic…)
  - **Réduire la morbidité :**

    Mieux connaître et réduire l'incidence : des troubles musculo-squelettiques (TMS), cancers, asthmes et troubles psychologiques et psychiatriques, liés à des facteurs professionnels *(quantification ultérieure).*
  - **Améliorer la réparation des maladies professionnelles.**

    Suivre, et faire baisser de moitié à l'horizon 2007, pour tous les régimes d'assurance maladie, par années, régions, âge, sexe, CSP, les rapports Maladies professionnelles attendues/Maladies professionnelles déclarées et Maladies professionnelles déclarées/ Maladies professionnelles réparées, en premier lieu pour les cancers, TMS, Asthme, MCV, dépressions liés au travail
- **Ces améliorations passent par un renforcement du système d'information en santé au travail et des ressources épidémiologiques spécialisées.**



La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé

- Le PNSE et son évaluation puis le PST
- Le Grenelle de l'environnement (atelier 3: santé et environnement):
- Le PNSE 2

PNSE (2004 - 2008)
Contexte européen et mondial

- 1989: Conférence de Francfort (52 pays): 1ères réflexions sur une stratégie Santé-Environnement
- 1999: Conférence de Londres: 43 pays de la région Europe de l'OMS engagés dans un plan national d'action Santé-Environnement NEHAP
- 2004: Conférence de Budapest : « Un futur pour nos enfants »
- Stratégie 2004-2010: SCALE (Science – Children – Awareness – Legislation – Evaluation)
  Présentation du PNSE français

PNSE (2004 - 2008) Objectifs

- une thématique émergente santé – environnement
- ↓
- mise en cohérence de l'action publique

- prévention des risques sanitaires liés aux agents
- physiques, chimiques et biologiques

- une approche intégrée des expositions
- dans les différents milieux de vie
  - général
  - domestique
  - professionnel → originalité du PNSE ++

PNSE (2004 – 2008)
3 objectifs majeurs
8 axes, 45 actions, dont 12 prioritaires

Garantir un air ↘
de bonne qualité
Boire une eau ↗

Prévenir les pathologies d'origine environnementale et notamment les cancers

Mieux informer le public et protéger les populations sensibles (enfants et femmes enceintes)

PNSE (2004 – 2008): Évaluation à mi-parcours

- effet structurant du champ SE, en rassemblant les actions en cours, en en créant de nouvelles, en favorisant le développement d'une recherche intégrante SE, en confortant et ouvrant le champ de l'AFSSET, en suscitant le plan Santé Travail
- conforme aux prévisions : 60% des actions sont en cours
- (28 sur 45), sans préjuger des résultats
- léger retard : 7 actions engagées, mais avec un retard imputable à des négociations / arbitrages interministériels ou institutionnels (PIRRP, ORP)
-

PNSE (2004 – 2008): Évaluation à mi-parcours

- retard significatif : 8 actions, à relancer ou à renforcer
- - promotion des modes de déplacement alternatif
- - lutte contre l'habitat insalubre
- - prévention des allergies (conseillers en environnement intérieur)
- - actions de formation, de prévention en entreprises
- - pas de Conseil national de la recherche
- retard préoccupant : 2 actions
- - réduction des particules diesel (incitations financières à mettre en œuvre)
- - intégration de la dimension santé environnement dans les formations initiales
-

PNSE (2004 – 2008): Évaluation à mi-parcours

– Absence d'évaluation financière

– PRSE : 26 adoptés

– difficulté de coordination avec PRSP :
– - calendrier
– - dépendance vis-à-vis des GRSP
– (peu d'acteurs de l'environnement)

Grenelle . Atelier Santé

- Réduction des rejets et de l'exposition aux substances les plus préoccupantes (benzène, mercure, trichloréthylène certains composés du chrome) pour l'ensemble des sources et des milieux
- Adjonction d'un plan santé transport pour les véhicules (tous types)
- Anticipation et prévention des risques liés aux produits, aux techniques et aux modifications de l'environnement
- Santé au travail
- Maîtrise des risques liés aux résidus médicamenteux

Grenelle . Atelier Santé

- Équité en santé-environnement:
  - points noirs
  - populations les plus sensibles ou les plus exposées : consultation santé-environnement gratuite pour les personnes les plus vulnérables
- Création de pôles interrégionaux pluridisciplinaires santé-environnement
- Respect sans délai des objectifs réglementaires pour les NOx et l'ozone
- Plan particules : les effets cardio-vasculaires et respiratoires des particules fines sont maintenant connus : un objectif de 15µg/m3 (PM 2,5) valeur cible en 2010 et obligatoire en 2015, soit une réduction de 30% par rapport à aujourd'hui

Grenelle . Atelier Santé

- Mise en place de systèmes de mesure et d'information sur la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant un public nombreux ou vulnérable (enfants, personnes âgées, etc.), et dans tous les établissements publics recevant du public
- Achèvement de l'inventaire des sites qui, historiquement, sont potentiellement pollués et le croiser avec celui des captages d'eau et des points d'accueil de populations sensibles pour prioriser les actions pour 2010
- Plan d'action sur la réhabilitation des stations-service fermées et des sites pollués orphelins
- Éradication du saturnisme

PNSE 2

- En cours de préparation.
- Organisation de la consultation publique prévue en octobre (comité régionaux de santé-environnement).

Le champ de la santé environnementale

- Environnement
- - organisation de la société (et du travail):
- * urbanisation
- * cadre de vie
- * organisation des transports …

« Tout ce qui n'est pas génétique est environnement »

- * modes de consommation
- * alimentation
- * comportements

Hygiène du milieu et Hygiène industrielle sont sources des plus grand progrès de l'histoire de l'humanité en matière de santé publique

- « Sans sous-estimer l'importance du formidable développement des technologies et sciences bio-médicales, surtout depuis le milieu du XXème siècle, il est juste de dire que les plus grands progrès de l'histoire de l'humanité en matière de santé ont été acquis – et le sont encore à l'échelle du globe – grâce à l'amélioration, quantitative et qualitative, de l'alimentation, et grâce à ces grandes mesures d'hygiène du milieu et d'hygiène industrielle qu'ont représentées, parmi d'autres, l'assainissement et l'élimination rationnelle des déchets, la délivrance d'une eau de boisson de qualité, la lutte contre les conditions inhumaines de travail, et la réduction des pollutions industrielles ».
- D. Zmirou. Introduction du PNSE.2004.

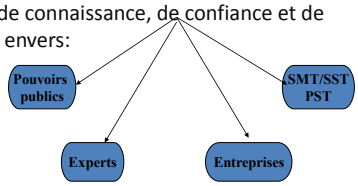
Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

L'approche individuelle de la santé environnementale

- La connaissance s'applique essentiellement au populations ou groupes de populations
- Au plan individuel, les risques sont habituellement « faibles » et certains groupes encourent un risque plus élevé (professions-groupes vulnérables)
- L'imputation d'un ou plusieurs facteurs environnementaux est la plupart du temps très difficile à affirmer, mais la demande est forte (cf CCPP – CCPE)
- Rôle des dispositifs réglementaires (définir des critères d'imputabilité qui tentent de réduire au maximum la marge d'improbabilité) et de l'action judiciaire (rapport de force – expertise(s)

Les nouvelles demandes sociales

- Individus et société
  - exigence de santé et de bien-être (mythe du risque zéro)
  - besoin de connaissance, de confiance et de fiabilité envers:
- 

Exemple du cancer du sein: publication du CIRC fin 2007

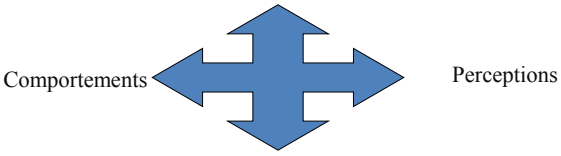
- → Le travail posté comportant une perturbation des rythmes circadiens est considéré comme probablement cancérogène pour l'homme (cancer du sein)
- Classement 2A:
  - Preuve limitée chez l'homme - Preuve suffisante en expérimentation animale
  - Preuve discutable chez l'homme - Preuve suffisante en expérimentation animale et forte preuve que la cancérogenèse soit le fait d'un mécanisme qui existe également chez l'homme
- Aboutissement de 30 ans de recherches:
- 6 études/8 mettent en évidence un risque légèrement augmenté de cancer du sein chez des femmes travaillant en horaires postés comportant un travail de nuit [http://oncology.thelancet.com Vol 8 déc 2007]

Autres facteurs de risques de cancer du sein:

- Génétique: mutations gènes BRCA1 ou 2
- Âge des premières règles
- Fréquence des grossesses
- Traitement hormonal (contraceptif – substitutif)
- Tabagisme actif – passif
- Certains facteurs nutritifs (consommation d'alcool, graisses ..)
- Facteurs professionnels ou environnementaux:
  - Stress professionnel: NS
  - CEM basse fréquence: résultats controversés
  - RI: possible si exposition forte
  - Solvants: résultats controversés
  - Pesticides: suspicion (RR1,4 .Engel; Am J Epid.2005 15;161:121-35)
  - (Excés P chlorés dans biopsie cancers du sein.(Cassidy; Breast Cancer ResTreat;2005;90:55- 64)
  - Quid d'une reconnaissance future de maladie professionnelle ?

L'approche environnementale de la promotion de la santé

- Environnement



SANTE

Prise de conscience nouvelle des enjeux sanitaires de l'environnement

- Baromètre INPES de l'environnement
- IRSN
- IFE
- ADEME
- AFSSET
- Commission européenne (eurobaromètres)

Modèles de perception des risques environnementaux

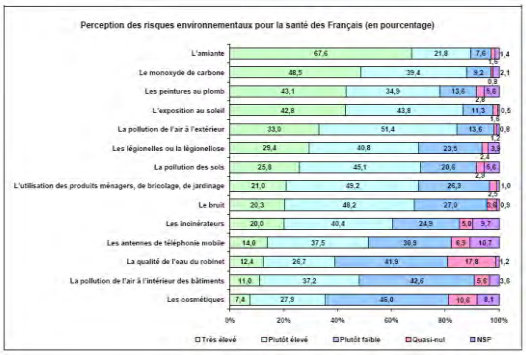
- Approche des relations homme/environnement
  - Transactionnelle (Ittelson 1973)
  - psychométrique (Slovic1975)
  - culturelle (Douglas 1982-Thomson 1990)
  - Constructiviste (Earle1995 – Kaperson 19988 – Pages 1990)

Modèles de perception des risques environnementaux à partir de caractères les qualifiant

- Inconnus
- Incertains
- Subis
- Incontrôlables
- Créés par l'homme
- Craints
- Catastrophiques
- Injustes
- Immoraux
- Mémorables

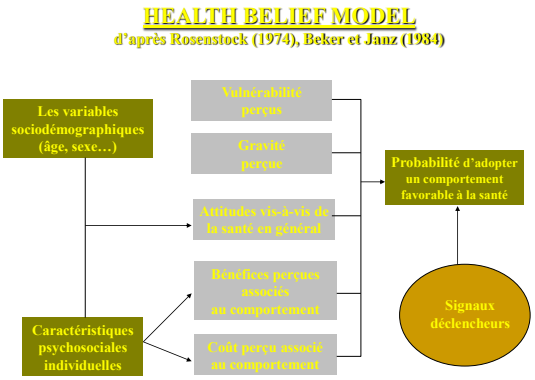
Risques avérés – controversés - émergeant

Enquête INPES 2008



Modification des comportements face aux enjeux sanitaires de l'environnement

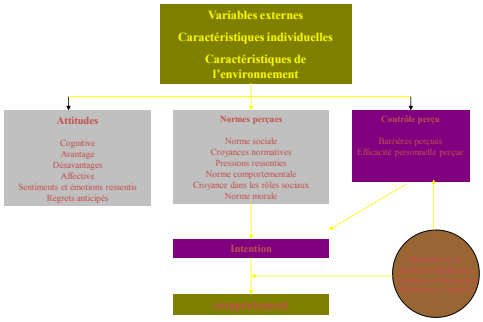
- Health Belief Model (Hochbaum, Rosenstok, Becker 1974))
- Théorie du comportement planifié (Fishbein, Ajzen 1975)
- Théorie de l'engagement (Kiesler, Beauvois, Joulé (1981)
- Modèle intégrateur (Godin 1996)



Modification des comportements face aux enjeux sanitaires de l'environnement

- Health Belief Model (Hochbaum, Rosenstok, Becker 1974)
- Théorie du comportement planifié (Fishbein, Ajzen 1975)
- Théorie de l'engagement (Kiesler, Beauvois, Joulé (1981)
- Modèle intégrateur (Godin 1996)

Modèle intégrateur de Godin



Les interactions entre santé et environnement. Santé publique et santé individuelle sous le regard du citoyen

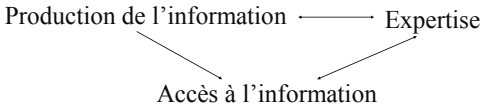
- L'environnement et la santé: une problématique (ré) émergeante
- 2. Un corpus de connaissances en évolution permanente
- 2.1. La production de connaissance
- 2.2. Les grandes questions de santé environnementale
- 2.2.1. Risques et milieux, dont le milieu de travail
- 2.2.2. Pathologies en lien avec l'environnement
- 2.2.3. Les populations sensibles et vulnérables
- 3. Santé-environnement, santé publique et santé individuelle
- 3.1. La santé dans l'environnement, élément de la politique nationale et régionale de santé
- 3.2. L'approche individuelle de la santé environnementale
- 3.1. La définition d'un lien entre l'environnement et la maladie dont on est atteint
- 3.2. L'approche environnementale de la promotion de la santé
- 4. Le regard du citoyen

Le regard du citoyen

- "Chaque individu a droit à un environnement compatible avec le niveau de santé et de bien être le plus élevé possible, à l'information sur l'état de l'environnement et sur les programmes, décisions et activités susceptibles d'agir sur l'environnement et sur la santé, et à participer au processus de prise de décisions". (Charte européenne)
- « Chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et favorable à sa santé.
- Toute personne a le devoir de prendre part à la préservation et à l'amélioration de l'environnement … » (Charte française)

Le regard du citoyen

- Information fiable compréhensible, proche du terrain, sans cesse actualisée, incluant les dimensions juridiques et économiques tentant de faire comprendre la réalité de l'incertitude scientifique.



La représentation des citoyens

- Existe au travers des élus, des partenaires sociaux, des associations, des experts « indépendants » ….
- Doit être sous-tendue par une éthique du débat ….

Conditions nécessaires

- Le système d'information sur les risques et la santé et le lien entre les deux
- La veille sanitaire environnementale
- La formation et la recherche en santé-environnement
- Le développement de l'expertise
- L'acceptation du principe de précaution

• Rapport de la Commission d'orientation du plan : http : //www.afsset.fr • Rapport de présentation du plan : • http://www.sante.gouv.fr • http://www.ecologie.gouv.fr • http://www.travail.gouv.fr • http://www.recherche.gouv.fr • Rapport de l'évaluation à mi-parcours : • http://www.sante.gouv.fr • http://www.ladocumentationfrancaise.fr • http : //www.afsset.fr	

Notre santé à l'épreuve du changement climatique

Pr Jean-Pierre Besancenot

Ancien directeur de recherche au CNRS

Psychose irraisonnée ou légitime préoccupation écologique, en tout cas enjeu primordial de société et défi posé à la communauté internationale, la question du changement climatique est devenue omniprésente, sans que l'on sache toujours exactement ce qu'elle recouvre. Par ailleurs, à la surface du globe, tous les pays, tous les milieux, naturels aussi bien que socio-économiques, seront-ils affectés au même point et de la même manière ? Auront-ils la même capacité à réagir ? D'un côté ont été brossés des scénarios apocalyptiques, allant jusqu'à envisager une possible extinction de l'espèce humaine ou, à tout le moins, une amputation de notre espérance de vie de plusieurs années, voire en certains endroits de plusieurs dizaines d'années. De l'autre, soit qu'ils nient l'éventualité même d'un changement climatique, soit qu'ils aient une foi inébranlable en la capacité de la science et de la médecine à surmonter tous les problèmes susceptibles de se poser, il est aussi des auteurs qui ont développé des thèses d'un optimisme béat : envers et contre tout, l'état de santé de l'humanité ne pourrait que progresser. De surcroît, l'objection est fortement ancrée dans les esprits qu'un peu de chaleur supplémentaire ne saurait faire de mal à quiconque… Alors, qui a tort ? Qui a raison ? Parce que l'irrationnel est le compagnon permanent des incertitudes et de la peur, le moment paraît venu de tenter un bilan dépassionné, affranchi du moindre parti pris militant, refusant à la fois de céder au catastrophisme à la mode et de se bercer d'illusions.

I. Le changement climatique

Bien qu'il soit intuitivement perçu comme un état stable permanent, le climat a toujours présenté une variabilité naturelle à caractère aléatoire, à laquelle se surimposait une variabilité tendancielle à la fois lente (étalée sur des dizaines ou des centaines de millénaires) et modérée (puisque, par exemple, l'écart entre les phases glaciaires et les interglaciaires du Quaternaire n'a pas dépassé 4 à 5°C en moyenne annuelle planétaire). À cela, qui a toutes les chances de perdurer, la plupart des spécialistes se rejoignent pour considérer que s'ajoute depuis les débuts de l'ère industrielle, au XVIII^{ème} siècle, et que s'ajoutera de plus en plus dans le futur, une autre modalité de variation, liée cette fois aux activités humaines, avec deux différences majeures : d'une part, son rythme serait incomparablement plus rapide, puisqu'elle serait sans doute perceptible à l'échelle de quelques décennies, en tout cas à celle d'une vie humaine ; d'autre part, son amplitude serait beaucoup plus marquée, sans que l'on soit encore capable de l'évaluer avec précision.

C'est une intensification de l'effet de serre qui est alors invoquée comme mécanisme explicatif. On rappellera à cet égard que l'effet de serre a toujours existé, depuis au moins 600 millions d'années : sans ce phénomène naturel qui piège sous forme de chaleur, dans les très basses couches de l'atmosphère, une partie du rayonnement reçu du soleil, la terre serait une planète morte, avec une température moyenne de -18°C, au lieu des +15°C actuels. Ce qui est en cause à l'origine des changements climatiques annoncés, c'est un effet de serre *additionnel*, dû à un dégagement massif de gaz tels que le dioxyde de carbone CO_2, le méthane CH_4, le protoxyde d'azote N_2O ou les organochlorés gazeux (CFC utilisés jusqu'à une date récente comme gaz propulseurs dans les bombes aérosols ou comme fluides réfrigérants). Au niveau mondial, et hors vapeur d'eau, le CO_2 contribue aujourd'hui pour 64 % à l'effet de serre additionnel, le CH_4 pour 19 %, le N_2O pour 6 % et les composés halogénés pour 11 %. L'ensemble des émissions a approximativement augmenté de 68 % entre 1971 et 2000. En France les transports, principalement routiers, sont responsables d'environ 26 % des émissions de gaz à effet de serre. Viennent ensuite, à peu près à égalité, l'industrie (20 %), le secteur résidentiel et les services (19 %) et l'agriculture (19 %). La transformation de l'énergie arrive assez loin derrière (13 %) tandis que les autres activités, à commencer par le traitement des déchets, se partagent les 3 % restants. Par rapport à 1990, certains secteurs ont largement réduit leurs rejets (de 21 %, en particulier, pour l'industrie), mais d'autres les ont augmentés (+22,3 % pour l'habitat et le tertiaire, + 22,7 % pour les transports). Dans les pays qui ne recourent pas ou recourent peu à l'énergie nucléaire

pour la production d'électricité, le poste « transformation de l'énergie » peut être proportionnellement beaucoup plus lourd (40 % en Allemagne).

À l'horizon 2050, les prévisions font état d'une relative stabilité pour l'Union Européenne et pour les autres pays dits « de l'annexe I », c'est-à-dire les pays industrialisés et les anciens pays de l'Est. En revanche le reste du monde, dont on n'oubliera pas qu'il rassemble 80 % des humains, devrait voir ses émissions multipliées au moins par trois, et peut-être par quatre. Il serait irresponsable de prendre le problème à la légère : si la Chine atteint le niveau de production des États-Unis sans réduire ses émissions de CO_2 par unité de produit national brut et par habitant, elle émettra à elle seule cinq fois plus que la planète entière n'a émis en l'an 2000. C'est dire à quel point il est illusoire d'escompter une limitation des émissions mondiales, si les pays émergents adoptent le mode de développement énergétivore que les pays riches ont suivi jusqu'à présent.

Reste à savoir en quoi cet effet de serre additionnel peut perturber l'équilibre du système climatique. C'est dès 1896 que l'éventualité d'un changement climatique, du fait d'une intensification de l'effet de serre, a été suggérée par le chimiste suédois Arrhenius mais, comme beaucoup de visionnaires dont le principal tort fut d'avoir raison trop tôt, il n'a guère rencontré d'écho. C'est seulement dans le courant des années 1950, et surtout des années 1960, que de rares chercheurs ont repris la question, qui les a conduits à prévoir un réchauffement de 2,5°C à échéance de l'an 2000 ; on verra que leurs craintes étaient largement exagérées. À partir de 1972, les travaux se sont multipliés et leurs conclusions ont paru suffisamment inquiétantes pour que soit convoquée à Genève, en 1979, la Première Conférence Mondiale sur le Climat, où le monde scientifique a essayé de mettre les gouvernements en garde contre les risques d'une intensification de l'effet de serre. Il n'en est cependant rien sorti de concret, les instances internationales organisatrices ayant estimé les divergences trop fortes pour justifier quelque décision que ce soit, en dehors de la mise en place d'un programme de recherche en physique de l'atmosphère. Il a donc fallu attendre le Sommet de la Terre réuni à Rio de Janeiro en 1992 pour assister à une double prise de conscience, médiatique et politique ; encore l'engagement pris, sans objectif chiffré juridiquement contraignant, consistait-il en une stabilisation des émissions « à un niveau qui empêche toute perturbation [...] dangereuse du système climatique ». Rien n'était précisé sur le niveau en question. C'est cinq ans et demi plus tard, fin 1997, qu'une réduction des émissions a été clairement programmée pour les pays industrialisés, mesures contraignantes à l'appui. Mais il a fallu attendre la décision du Président Poutine à l'automne 2004 pour que le protocole de Kyoto, ratifié par un nombre suffisant de pays responsables de 55 % des émissions, puisse entrer en application à partir de février 2005. L'accord prévoit, pour la période 2008-2012, que les signataires ramènent en moyenne leurs émissions de gaz à effet de serre à 5,2 % au-dessous du niveau de 1990, avec une forte modulation suivant les pays, en fonction de leurs capacités technologiques et financières (-28 % pour le Luxembourg, -21 % pour l'Allemagne et le Danemark, -12,5 % pour le Royaume-Uni, -6,5 % pour l'Italie, etc., alors que la France doit simplement revenir au niveau de 1990, et que l'Espagne et le Portugal ont obtenu l'autorisation de dépasser ce niveau, respectivement, de 15 et de 27 %).

Aux yeux de nombreux scientifiques, la question ne se pose plus vraiment de savoir si le climat de la terre est en train de changer et va continuer à changer. Trois raisons, fortement imbriquées, font que leur réponse ne saurait être que positive :

- La première tient à l'inertie des diverses composantes du système climatique, et notamment de son compartiment océanique, mais aussi de la banquise, des grandes calottes glaciaires et, *a fortiori*, de la couche superficielle du manteau terrestre.

- La deuxième raison est liée à la « durée de vie » de nombreux gaz à effet de serre, autrement dit à leur temps de résidence dans l'atmosphère et, par suite, à la

rémanence de leur impact climatique. Certes, ce temps de séjour reste assez bref, de 8 à 13 ans, pour le méthane, en partie réabsorbé par le sol ou oxydé naturellement dans l'air. Mais il dépasse le siècle pour le CO_2, lentement transféré dans l'océan ou la biomasse, et pour le protoxyde d'azote. Surtout, il atteint plusieurs dizaines de millénaires pour certains substituts des CFC, comme les perfluorocarbures − pour autant, du moins, que l'on soit capable de l'évaluer.

- Enfin la troisième raison, c'est que les structures économiques sont difficilement compatibles dans l'immédiat avec la réduction massive des émissions qui serait nécessaire pour obtenir la stabilisation des concentrations. Tout compte fait, la réussite ou l'échec des grands programmes de réduction des rejets ne dépendra ni de facteurs purement techniques, ni de facteurs strictement économiques, mais d'une évolution de nature culturelle, au sens où il s'agit avant tout de changer la « culture énergétique » des populations et de leurs dirigeants. Il y a là un authentique choix de société, qui ne saurait être qu'une tâche de longue haleine. Il est donc vain d'espérer que la production anthropique de gaz à effet de serre puisse ne pas augmenter dans les années à venir.

Cela dit, le point qui fait peut-être le plus débat est de savoir si le réchauffement annoncé est d'ores et déjà amorcé. Plusieurs arguments convergents militent en faveur d'une évolution déjà engagée. Le XX^{ème} siècle aura été le plus chaud du millénaire : après correction de différents biais, et même si la précision fournie est illusoire, la hausse de la température moyenne peut être évaluée à 0,76°C sur la série 1860-2005, et à 0,74°C sur la série 1900-2005, sans que la marge d'erreur n'excède 0,2°C. Dans le cours du XX^{ème} siècle, c'est sans équivoque la décennie 1991-2000 qui a enregistré les plus fortes températures. Le changement de millénaire n'a ensuite fait qu'amplifier l'évolution, puisque douze des treize dernières années ont été plus chaudes que toutes celles qui les avaient précédées depuis le début des observations météorologiques, lesquelles remontent en bien des endroits au milieu du XIX^{ème} siècle. L'unique exception est fournie par 1996. Quant aux records, ils reviennent à peu près à égalité aux deux années 1998 et 2005 (où la température s'est inscrite à environ 0,6°C au-dessus de la moyenne 1961-1990), puis dans l'ordre à 2002, 2003, 2007, 2004 et 2006. L'impression qui se dégage de ces constats est donc bien celle d'une tendance qui s'est énergiquement accentuée au cours des années les plus récentes.

Il est encore plus aventureux de se projeter vers le futur que de considérer le présent. À l'observation il faut alors substituer la modélisation numérique, rendue possible depuis une trentaine d'années par la montée en puissance des calculateurs. Les résultats obtenus sont moins des prévisions que des scénarios d'évolution possible, en fonction de diverses hypothèses de contrôle socio-économique et technique des émissions de gaz à effet de serre. Tel est notamment le cas des projections diffusées par l'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC,* ou en français *Groupe Intergouvernemental pour l'Évolution du Climat, GIEC).* Au cours des dernières années, cet organisme a plusieurs fois révisé à la hausse ses projections d'évolution des températures au XXI^{ème} siècle. Alors que son Deuxième Rapport, publié en 1995, faisait état d'une possible élévation de 1,0 à 3,5°C d'ici à 2100, le Troisième, daté de 2001, évoque un réchauffement potentiel de 1,4 à 5,8°C. Quant au Quatrième, adopté en février 2007, il situe la fourchette extrême d'élévation thermique par rapport à 1990 entre 1,8 et 4,0°C, intervalle ensuite élargi de 1,1°C à 6,4°C pour prendre en compte les marges d'incertitude. Entre l'hypothèse basse et l'hypothèse haute, l'écart est considérable. Mais il convient de bien saisir la signification des chiffres présentés, car la forte médiatisation de la fourchette de résultats de l'IPCC a conduit à des malentendus. En fait, seule environ la moitié de l'écart constaté provient de causes structurelles, essentiellement l'imperfection des modèles climatiques, encore incapables d'intégrer correctement tout un ensemble de rétroactions internes. L'autre moitié traduit une incertitude conjoncturelle, qui prend en compte à la fois l'évolution naturelle du climat en dehors des forçages anthropiques et les différences entre les scénarios économiques ou géopolitiques retenus − ce qui veut dire qu'elle exprime avant tout la marge de manœuvre qui reste à nos sociétés !

Finalement, et quel que soit le chiffre retenu à l'intérieur de la fourchette IPCC, il peut au premier abord paraître relativement modéré. Mais il convient de rappeler ce qui a été dit plus haut : 4 à 5°C seulement séparent en moyenne l'époque actuelle du plus fort d'une glaciation ! En outre, il est important d'avoir à l'esprit que 1°C de réchauffement « équivaut » à un déplacement approximatif de 200 kilomètres en direction du pôle, ou à une remontée d'environ 150 mètres en altitude. En conséquence, si l'on retient la partie médiane de la fourchette des estimations, à 3,5°C de réchauffement, les températures actuelles de Marseille se retrouveraient en 2100 sur Luxembourg, et il faudrait monter à un peu plus de 500 mètres pour enregistrer l'équivalent des conditions thermiques observées aujourd'hui au niveau de la mer. Ce n'est donc pas à des retouches de détail qu'il faut s'attendre, mais à une *profonde transformation* de la répartition spatiale des climats de la terre.

Encore la hausse des températures ne serait-elle vraisemblablement uniforme ni dans le temps ni dans l'espace : plus marquée de nuit et en hiver que de jour et en été, elle serait très forte dans le monde polaire et sur ses marges, plus modérée aux latitudes moyennes et peu perceptible en zone intertropicale. Elle n'exclurait pas des refroidissements en certains endroits ou à certaines périodes. En outre, l'élévation moyenne de la température s'accompagnerait probablement d'une multiplication des événements extrêmes. Mais on se gardera bien de conclure à partir de phénomènes isolés et l'on évitera d'interpréter les tempêtes de décembre 1999 ou la canicule de l'été 2003 comme les indices d'un changement climatique déjà installé. Tout au plus les modèles (qui valent uniquement par ce que l'on y introduit…) nous enseignent-ils que, dans l'hypothèse d'un effet de serre additionnel, on devrait assister soit à une fréquence accrue, soit à une intensité majorée de ces paroxysmes météorologiques.

Or, chacun sait que la santé humaine est à de multiples égards sous la dépendance des facteurs d'environnement en général, et du contexte climatique en particulier. Si le climat change, la tentation est grande d'établir un inventaire des conséquences sanitaires auxquelles on peut s'attendre. Mais il convient de distinguer avec soin, parmi les effets possibles d'un réchauffement climatique, ceux qui s'exerceraient directement sur l'organisme humain et ceux qui se feraient sentir en façonnant des conditions écologiques plus ou moins favorables à la survie, à la multiplication et au développement de tel ou tel germe pathogène, ou de tel ou tel insecte hématophage vecteur de ce germe. C'est par ce dernier point que l'on commencera, sans trop s'attarder étant donné que la question de l'émergence et/ou de la résurgence des maladies infectieuses, chez l'homme aussi bien que chez l'animal, sera de nouveau – et beaucoup plus longuement – traitée dans les deux communications qui suivent.

II. Les effets indirects d'un réchauffement climatique sur la santé

Dans nombre de maladies infectieuses, les agents pathogènes sont transmis d'un hôte porteur à un nouvel hôte, donc d'un animal à un autre animal, d'un homme à un autre homme, ou d'un animal à un homme, par la piqûre d'un arthropode, qui le véhicule dans son tube digestif et l'inocule à la faveur d'un repas de sang. Or nombre d'arthropodes sont sensibles à l'état thermo-hygrométrique ambiant, et c'est à travers eux que le changement climatique est le plus régulièrement incriminé dans l'évolution potentielle de la pathologie infectieuse. Si l'on fait abstraction des répercussions possibles sur d'autres composantes du système épidémiologique, comme la végétation ou les comportements humains, l'impact d'un dérèglement climatique sur un vecteur peut se manifester selon plusieurs modalités, ni incompatibles ni mutuellement exclusives, et qui peuvent se potentialiser.

La conséquence qui se présente immédiatement à l'esprit est une *modification de la répartition spatiale du vecteur*, qui « remonte » vers le nord (dans l'hémisphère boréal), « descend » vers le sud (dans l'hémisphère austral) ou grimpe en altitude (un peu

partout). Une élévation significative et durable de la température peut ainsi faciliter l'introduction d'un vecteur dans un milieu jusque-là indemne. Elle peut aussi amener sa disparition d'une région où il était présent, si les nouvelles conditions climatiques lui imposent un effort d'adaptation disproportionné à sa capacité de résistance. Une deuxième répercussion envisageable concerne la *modification de la densité du vecteur*, une espèce rare pouvant devenir abondante lorsqu'elle bénéficie de conditions plus favorables, et réciproquement.

On se gardera toutefois de tirer de ces deux points des conclusions trop rapides. En effet, la répartition géographique d'une maladie ne se superpose jamais qu'imparfaitement à celle de son vecteur, car bien d'autres facteurs limitants sont simultanément à l'œuvre. Il n'y a pas non plus de stricte proportionnalité entre l'abondance d'un vecteur et l'intensité de la transmission, définie en termes de nombre de piqûres infectantes, le nombre de piqûres infectantes n'étant à son tour qu'un piètre prédicteur de l'incidence de la maladie associée – ne serait-ce qu'en raison de l'immunité qu'acquiert la population exposée à des piqûres répétées. La transmission vectorielle n'est compréhensible que si l'on fait intervenir les multiples rapports d'interdépendance existant entre les vertébrés impliqués dans le cycle de transmission (réservoirs naturels de l'agent infectant, populations humaines ou animales réceptives), les micro-organismes pathogènes et les vecteurs. Toute déduction appuyée sur la seule bio-écologie des vecteurs exposerait à de graves déconvenues.

Un changement climatique peut aussi influer sur l'occurrence d'une maladie vectorielle *en allongeant ou en raccourcissant l'incubation extrinsèque,* c'est-à-dire la durée du cycle de développement de l'agent infectieux dans l'organisme de l'arthropode, ou en d'autres termes l'intervalle qui sépare l'infection du vecteur du moment où il est à même d'infecter un autre vertébré, l'homme pour ce qui nous intéresse ici. Plus l'incubation extrinsèque est courte, plus la transmission a des chances de se produire. Sinon, compte tenu notamment de la faible longévité habituelle des insectes, de l'ordre d'un à deux mois pour la plupart des moustiques femelles, le vecteur a une forte probabilité de mourir avant de devenir infectant, même si lui-même a été infecté et *a fortiori* s'il l'a été à un âge un peu avancé. Or, le contexte thermique module également la *durée de vie du vecteur*, soit en l'allongeant (dans le cas d'un relèvement modéré de la température, surtout s'il va de pair avec un renforcement de l'humidité atmosphérique et des précipitations), soit en l'abrégeant (lorsque le réchauffement est trop marqué, ou qu'il s'accompagne d'une intensification de la sécheresse). En particulier, la raréfaction des pluies et la diminution des lames d'eau précipitées rendent la vie très difficile à de nombreux insectes et provoquent dans leurs rangs une forte mortalité.

Des effets plus subtils, encore incomplètement cernés, peuvent également s'exercer sur le caractère permanent ou saisonnier de la transmission (avec des répercussions capitales sur la rapidité d'acquisition et le niveau de l'immunité), sur la fréquence des repas sanguins (en principe plus élevée quand il fait plus chaud) et sur la production d'œufs (plus abondante à mesure que la température s'élève, au moins jusqu'à un certain seuil, variable d'une espèce à l'autre). Le changement climatique peut, enfin, modifier les contacts écologiques entre populations, que ce soit entre réservoirs de virus et vecteurs ou entre vecteurs et hommes réceptifs.

Mais, pour des raisons biologiques ou comportementales, tous les arthropodes vecteurs ne présentent pas une égale sensibilité aux variations climatiques. C'est ainsi, par exemple, que les puces, les poux et les punaises, qui vivent presque en permanence dans le pelage de leurs hôtes, dans leurs terriers ou dans leurs maisons, y bénéficient d'un environnement d'abri, où les fluctuations de l'ambiance extérieure sont particulièrement amorties. Tout porte donc à penser que l'évolution du climat n'a sur eux, et sur les maladies qu'ils transmettent, qu'un impact très limité. À l'opposé, les insectes qui vivent une partie ou la totalité de leur cycle dans le milieu extérieur sont beaucoup plus sensibles aux variations climatiques, si modérées soient-elles. Ceci vaut

tout spécialement pour ceux qui passent successivement par une phase aquatique et une phase aérienne. On s'accorde souvent à considérer que les moustiques pourraient être dans l'avenir, et sont peut-être déjà les plus affectés. Dans l'ensemble, leurs populations tireraient plutôt bénéfice d'un réchauffement, d'abord en termes de densité, ensuite parce que leur période d'activité dans l'année aurait tendance à s'allonger. C'est du reste ce double constat, à plus ou moins bon escient étendu à d'autres variétés d'insectes, qui alimente l'une des craintes majeures des pays économiquement et socialement développés, à savoir la colonisation massive des zones tempérées, domaine méditerranéen inclus, par des vecteurs d'origine tropicale ou subtropicale. Si tel était le cas, en effet, la « mondialisation » de nombre de maladies infectieuses ou parasitaires, aujourd'hui cantonnées aux basses latitudes, deviendrait quasiment inéluctable.

Mais des vecteurs tropicaux peuvent-ils vraiment coloniser les zones extratropicales ? La question est trop complexe pour appeler une réponse univoque, et l'on doit se méfier à son propos d'un raisonnement trop simpliste. Pour que des maladies vectorielles débordent largement de leur aire habituelle de répartition, deux conditions doivent être simultanément remplies. La première est que les vecteurs se déplacent. La seconde est qu'ils trouvent à leur point d'arrivée des conditions qui soient favorables à leur installation durable.

Il est indiscutable que *les arthropodes vecteurs voyagent*, activement ou passivement. Le voyage passif, notoirement sous-évalué, est par exemple celui des tiques accrochées au pelage ou au plumage d'autres animaux. Le voyage actif est, entre autres, celui des moustiques qui empruntent en masse les moyens de transport modernes, à commencer par les avions. Sans doute la majorité meurt-elle en cours de vol, mais certains résistent tout à la fois aux conditions extrêmement rudes du voyage et aux pulvérisations d'insecticide ; ils se retrouvent à l'arrivée dans les carlingues et, plus encore, dans les containers ou les soutes. Des moustiques, enfermés dans les coffres du train d'atterrissage d'un Boeing 747, ont survécu à six, sept ou huit heures de vol par -42°C ! À Londres, une fouille méticuleuse a permis de découvrir divers insectes vivants dans près d'un long-courrier sur cinq en provenance de pays tropicaux. De même au Japon, sur 928 avions prospectés, 399 hébergeaient à l'arrivée des insectes encore en vie, dont 13 espèces de moustiques. Le transport maritime peut du reste jouer un rôle comparable, quoique sur une échelle moindre.

La cause est donc entendue : les vecteurs voyagent. Mais sont-ils ensuite *capables de s'acclimater et de faire souche* ? Certains exemples ne laissent guère de place au doute. Ainsi, jusqu'aux débuts de l'aviation civile en 1936, l'île de Guam, en Micronésie, ne comptait que cinq espèces de moustiques ; mais après la fin de la seconde guerre mondiale, la mise en service d'un aéroport international en a régulièrement introduit de nouvelles, dont certaines se sont peu à peu fixées ; en 1969, elles étaient 15, et 35 trois ans plus tard, véhiculant deux maladies jusque-là inconnues, le paludisme et la dengue. C'est également au rythme de la création des aéroports qu'*Aedes ægypti,* vecteur majeur de la fièvre jaune, a envahi les îles et îlots de la Polynésie. Ces exemples, que l'on multiplierait à loisir, présentent un point commun : ils concernent des migrations de vecteurs tropicaux à destination d'autres pays tropicaux, donc des migrations sud-sud. Bien que beaucoup moins nombreuses, des migrations nord-nord, voire nord-sud, sont aussi attestées. Mais il ne semble pas que l'on n'ait jamais observé l'adaptation massive à un climat extratropical de vecteurs originaires des basses latitudes. Certes, des phénomènes ponctuels d'acclimatation, biologique ou comportementale, peuvent intervenir ; on pense aux moustiques qui peuplent les villes arctiques, où ils réussissent à passer la saison froide en se réfugiant dans les égouts. Il n'empêche qu'une implantation définitive exigerait la capacité, pour le vecteur, de développer des gênes lui permettant d'entrer en diapause, autrement dit dans une période de vie ralentie, indispensable à la survie dans des pays à hiver froid.

Le danger que constitue l'importation de nouveaux vecteurs est donc partiellement atténué par les difficultés que ces vecteurs rencontrent pour s'acclimater. Il n'empêche que, dans ce domaine, toute prévision est aventureuse, d'autant que la règle qui vient d'être énoncée (pas d'implantation durable à l'issue des migrations sud-nord) souffre des exceptions, au moins relatives. La plus évidente est fournie par *Aedes albopictus*, capable de proliférer sous une gamme étendue de climats. Jusqu'à une date récente, le nom savant de ce moustique n'était connu que des spécialistes, mais il est passé dans le langage courant lors de l'explosion épidémique du chikungunya à Mayotte et dans l'île de la Réunion.

Aedes albopictus s'est longtemps limité à l'océan Indien, ainsi qu'à un vaste espace joignant le Sud-Est asiatique à l'Extrême-Orient, sans que l'on ait encore la certitude qu'il se soit agi partout de la même espèce ; peut-être y en avait-il deux, l'une plutôt de climat tropical, l'autre plutôt de climat tempéré. Quoi qu'il en soit, ce moustique au corps noir tigré de blanc, qui affectionne les récipients suffisamment creux pour renfermer de l'eau croupie, a commencé vers le milieu des années 1970 à quitter son aire d'origine pour occuper progressivement la majeure partie du globe. C'est ainsi que, dès 1979, il a été repéré en Albanie. Il a ensuite gagné le Nouveau Monde où, à partir de Houston, il a rapidement pris possession de tout l'est des États-Unis, du Texas au Delaware : en moins de deux ans, 17 états ont été envahis. Il est ensuite repassé en Europe où, à partir de 1990, il s'est mis à pulluler dans la moitié septentrionale de l'Italie, tout en faisant des incursions plus discrètes en Belgique, en Suisse, en Espagne, en Hongrie, en Serbie et au Monténégro... Il a également été détecté, parfois en minuscules colonies, parfois en grande abondance, au Mexique, au Brésil, en Afrique australe, au Nigéria, au Cameroun et dans le Pacifique sud. Quelques spécimens ont été découverts en France à l'automne 1999, en Basse-Normandie et dans la Vienne, puis dans l'Oise ; une vigoureuse campagne d'éradication en est venue à bout, mais le moustique a ensuite été réintroduit en domaine méditerranéen et, depuis 2004-2005, il a réussi à s'établir dans plusieurs quartiers de Menton et de Nice. Sa marge de progression, liée à sa plasticité écologique et à la multiplicité de ses formes d'adaptation, est jugée énorme. Sa seule véritable limite pourrait être une température moyenne annuelle de l'ordre de 0°C. Il s'ensuit que, quoi que l'on fasse, *Aedes albopictus* continuera sur sa lancée ; ce n'est qu'une question de temps...

Sa dissémination a d'abord été mise au compte presque exclusif du changement climatique, mais le fait que la variété tempérée de ce moustique survive sans trop de mal aux hivers de Pékin rend l'hypothèse peu crédible : ce ne sont pas quelques dixièmes de degré en plus qui ont pu permettre son implantation, par exemple, en Toscane ou en Floride ! En réalité, ce qui s'est passé au cours des dernières années semble avant tout lié au développement des transports, maritimes peut-être plus qu'aériens, et spécialement au commerce international des pneumatiques usagés, pour le rechapage. Les pneus sont en effet une marchandise peu fragile, stockée en plein air, en vrac ou en piles non protégées. Ces stocks sont exposés aux intempéries et finissent par contenir de grandes quantités d'eau constituant d'excellents gîtes de ponte, d'autant que cette eau accueille avec le temps de la matière végétale en décomposition et la flore bactérienne associée, qui constituent la source alimentaire des larves de moustiques. Ces dernières peuvent donc survivre à des trajets de plusieurs semaines, et ce n'est pas un hasard si l'introduction d'*Aedes albopictus* dans un nouveau pays ou une nouvelle région s'est presque toujours faite à partir de sites d'entreposage de pneus. Le changement climatique n'est par conséquent pour rien dans le caractère expansionniste de ce moustique, mais il peut ensuite faciliter son installation. Rien ne s'oppose ainsi à ce qu'*Aedes albopictus* gagne maintenant tout le Midi méditerranéen français, où ses exigences écologiques seraient satisfaites, puis à ce qu'il envahisse tout ou partie du pays si le réchauffement se confirme.

Or ce nouveau venu, quasiment impossible à déloger une fois installé en grand nombre, constitue non seulement une nuisance certaine, mais aussi une sérieuse menace pour la santé. Il se comporte en effet, dans son Asie originelle, comme un relativement

bon vecteur de la dengue, de sorte que son implantation durable pourrait rendre le bassin méditerranéen à nouveau réceptif à cette maladie. De plus, on le soupçonne d'être également un vecteur potentiel du virus West Nile et de la fièvre de la vallée du Rift, dont il sera question plus tard. Il paraît donc grand temps de mettre en place une surveillance adéquate de ce moustique, à l'image de ce qu'ont réalisé les Italiens. Malheureusement, il n'est pas sûr que l'on dispose en France des moyens pour le faire, l'entomologie médicale et vétérinaire étant à bien des égards une discipline sinistrée, avec des effectifs en chute libre. Pourtant, si l'on veut combattre efficacement les insectes vecteurs, il faut savoir les identifier correctement et les situer dans un contexte évolutif.

Le paludisme est l'une des maladies que l'on prétend les plus sensibles aux conditions thermo-hygrométriques. Il est dû à un parasite hématozoaire du genre *Plasmodium,* transporté dans la salive du moustique anophèle femelle. Les anophèles prolifèrent en ambiance chaude et humide. Comme les trois premiers stades de leur développement (œuf, larve et nymphe) sont aquatiques, et que seuls les adultes mènent une vie aérienne, leur écologie se définit avant tout par rapport aux collections d'eau de surface. Ils se reproduisent à proximité de l'eau, notamment dans les zones marécageuses et les mares. Le temps nécessaire au développement du parasite dans le corps du vecteur (cycle sporogonique) dépend de l'espèce et de la souche de l'hématozoaire, ainsi que de l'espèce et de la souche du moustique, mais aussi de la température et de l'humidité ambiantes (à 25°C, le cycle complet se réalise en 10 à 13 jours, alors qu'il en requiert entre 14 et 18 à 22°C). *Plasmodium falciparum* cesse d'être transmis lorsque la température extérieure vient à descendre au-dessous de 18 ou 19°C, le seuil critique se situant à 15 ou 16°C pour *P. vivax*. On évitera néanmoins de voir dans ces chiffres des limites absolues, car l'anophèle peut trouver des conditions microclimatiques plus clémentes, surtout pendant la nuit, dans divers locaux… De manière symétrique, il existe un seuil supérieur, voisin de 33°C, au-delà duquel l'incubation extrinsèque ne parvient plus à son terme, alors que le parasite meurt dans le corps de l'anophèle aux alentours de 37°C. Quant aux eaux excessivement chaudes, elles tuent la plupart des larves. Dans ces conditions, on conçoit que la répartition géographique de la maladie puisse se trouver affectée par un réchauffement climatique. Une élévation de la température aurait pour effet de raccourcir le cycle sporogonique, ce qui accroîtrait la capacité vectorielle de l'anophèle. Le réchauffement pourrait donc augmenter le niveau de transmission en un lieu donné et permettre la transmission dans des régions où elle était auparavant rendue impossible par des températures trop basses. Il pourrait en résulter une extension en latitude de la zone d'endémie. Des craintes sont ainsi permises pour le nord du Sahel, pour la majeure partie du Maghreb, pour la Turquie, pour le Proche et le Moyen-Orient, ainsi que pour l'Afrique du Sud, pour les *tierras calientes* du Yucatan et du Centre-Est mexicain, pour le Brésil méridional ou pour le sud de la Chine. Un autre risque d'envergure est celui d'une extension de la maladie vers des altitudes plus élevées, alors qu'aujourd'hui les montagnes tropicales sont généralement indemnes au-dessus de 1400-1500 m en Asie ou de 1600-1800 m en Éthiopie. Il s'ensuit que si, en 1990, 45% de l'humanité vivait dans des régions où sévit le paludisme, le taux pourrait atteindre 60% en 2040 ou 2050, du double fait de l'élargissement de la zone impaludée et de sa forte croissance démographique.

Une question très débattue est de savoir si l'évolution est déjà perceptible. D'aucuns l'affirment, sans que les exemples fournis emportent la conviction. Ainsi, au-dessus de 1000 m sur les Hautes Terres malgaches, une épidémie meurtrière a déferlé de 1986 à 1988, dans un secteur où les pulvérisations intradomiciliaires d'insecticides rémanents et les distributions de chloroquine avaient permis, un quart de siècle plus tôt, la presque élimination du paludisme. On a parlé de 100 000, voire de 300 000 morts par an, même si le bilan doit plutôt se situer entre 15 et 30 000. Le réchauffement des Plateaux et une succession de typhons ont aussitôt été incriminés. Pourtant, la température a présenté une stabilité remarquable. L'explication ne se situe donc pas là. La réalité est qu'à partir de 1961, le relâchement de la lutte antivectorielle, puis l'abandon des traitements

prophylactiques et curatifs a permis la reconstitution progressive des populations d'anophèles et du réservoir de parasites. Les Malgaches des Hautes Terres se trouvaient en outre dépourvus de toute immunité, puisqu'ils n'avaient plus eu de contact avec le parasite depuis au moins 20 ans. Dans un contexte de crise économique sévère, la dégradation des services de santé, la pénurie de médicaments et la baisse du pouvoir d'achat de la population ont fait le reste, même s'il est vrai que la stabulation du bétail au rez-de-chaussée des habitations, pour faire face au développement de l'insécurité, a pu localement aggraver la situation… De même, une terrible épidémie a éclaté en 1994 entre 1500 et 1700 mètres d'altitude, dans les montagnes du Sud-Ouest de l'Ouganda ; cette fois, la température a augmenté, mais si peu (de 0,4 à 0,6°C en trente ans) que les facteurs humains paraissent là encore avoir joué un rôle décisif : les effectifs de la population ont plus que triplé et les papyrus qui occupaient jusque-là les fonds de vallée ont été détruits ; or, ils sécrètent une huile essentielle qui forme un film à la surface de l'eau, s'opposant très efficacement à la présence de moustiques...

Cela étant admis, qu'en est-il aux latitudes moyennes, et spécialement en France ? Il ne faut pas oublier que la maladie y a sévi à l'état endémique jusqu'au début du XX^{ème} siècle, comme elle a sévi en Scandinavie, et que, si elle a été éradiquée, ce n'est pas à la suite d'un refroidissement, mais grâce à la lutte antivectorielle, ainsi qu'à l'assainissement des terres humides et des marais. Le climat ne constitue donc pas un facteur limitant et l'on se trouve aujourd'hui dans la situation d'un anophélisme sans paludisme, la présence de vecteurs potentiels n'entraînant plus la transmission de la maladie. On ajoutera que des cas cliniques de paludisme importé sont régulièrement signalés aux abords des aéroports internationaux, sans qu'il en résulte la moindre flambée épidémique. Seul un apport massif de parasites, d'une souche compatible avec les populations anophéliennes locales, pourrait occasionner une reprise de la transmission. Mais dans cette éventualité, il est probable que la réintroduction de la maladie serait aussitôt détectée, donc assez facilement maîtrisée. Il s'ensuit que, sans être nul, le risque reste minime, pour ne pas dire infime. À l'inverse, de vives inquiétudes sont permises, par exemple, pour le territoire de l'ex-URSS, où l'on dénombrait quelque 30 millions de cas annuels de paludisme avant la seconde guerre mondiale et où le système de santé souffre aujourd'hui d'une désorganisation telle que ni la surveillance épidémiologique ni le contrôle des populations de vecteurs ne sont correctement assurés. On saisit par là combien l'impact du paludisme et l'efficacité des moyens de lutte restent liés au niveau socio-économique des populations, plus qu'au climat.

À bien des égards, le lien changement climatique/paludisme apparaît comme un faux problème dont on parle beaucoup, alors qu'il est peut-être de vrais problèmes dont on parle peu. On se limitera ici à l'exemple des leishmanioses. Ces maladies parasitaires transmises par la piqûre des phlébotomes femelles se présentent sous deux formes, l'une cutanée, le plus souvent bénigne, l'autre viscérale, plus grave, fréquente sur le pourtour méditerranéen et actuellement en progression dans le cadre de co-infections avec le VIH. Le rôle du climat varie suivant la forme de leishmaniose considérée. Dans la forme viscérale, la distribution géographique du réservoir canin ne dépend évidemment pas du climat, mais à peu près exclusivement de l'homme. Il en va autrement dans la forme cutanée où le réservoir animal, constitué par des rongeurs, est inféodé à des biotopes spécifiques. Il paraît plausible d'admettre que l'abondance de ces rongeurs, leur dynamique de reproduction et leur longévité sont en partie sous la dépendance des conditions thermiques et de l'humidité, mais la rareté des recherches sur ce point ne permet pas d'en dire beaucoup plus. En revanche, il ne fait plus de doute que, si le climat est susceptible d'agir sur les leishmanioses, c'est essentiellement *par l'intermédiaire des phlébotomes*, dont l'optimum écologique correspond à un climat relativement chaud, sans écart excessif entre le jour et la nuit, mais avec un certain degré d'humidité. Un mois avec une moyenne de 20°C semble un minimum ; encore dans ce cas l'incubation extrinsèque dépasse-t-elle la durée de vie de la majorité des phlébotomes. Il faut également que la température moyenne annuelle ne descende pas au-dessous de 10°C. On comprend dès lors pourquoi, en Bas-Languedoc, la leishmaniose canine autochtone et

son vecteur, absents de la zone littorale, rares dans le proche arrière-pays, trouvent des conditions optimales sur le piémont cévenol, de la haute vallée de l'Hérault à celle du Gardon et de la Cèze, là où le chêne vert cède la place au chêne pubescent. Mais c'est au Maroc que le rôle discriminant du climat dans la distribution spatiale des phlébotomes a été le mieux établi.

Des changements climatiques d'amplitude même modeste peuvent dès lors exercer une influence décisive sur la distribution spatiale et altitudinale des vecteurs et, par suite, de la maladie. Il ne s'agit pas là d'une simple vue de l'esprit, puisque l'on constate déjà une évolution dans ce sens. Deux enquêtes réalisées à douze ans d'intervalle auprès des vétérinaires ont révélé que, hormis quelques cas isolés, seuls six départements sur la France entière étaient touchés en 1988 ; leur nombre est passé à quinze en 2000. De plus à l'intérieur des régions concernées, la densité des vecteurs et le nombre de cas de leishmaniose sont allés en augmentant, sans que l'amélioration du dépistage puisse être seule en cause. Dans les Cévennes, de 1933 à 1972, on comptait une moyenne de 0,04 cas de leishmaniose viscérale pour 100 000 habitants ; sur les vingt-deux années suivantes, entre 1973 et 1994, ils étaient déjà six fois plus nombreux. Traditionnellement, on ne connaissait en France que quatre foyers de leishmaniose, tous situés au-dessous de 800 mètres d'altitude : les Cévennes, l'agglomération marseillaise à distance du centre-ville, le littoral des Alpes-Maritimes et, très accessoirement, la Corse. Au cours des dernières années, ces différents foyers ont en quelque sorte fusionné et aujourd'hui, c'est l'ensemble du triangle Andorre-Lyon-Nice qui peut être considéré comme infecté. De surcroît, une présence ponctuelle de phlébotomes est également signalée au nord de cette région, avec des microfoyers sporadiques dans la vallée de la Loire ou autour de Limoges.

Il est toujours délicat d'en tirer des prédictions pour le futur, mais la remontée vers le nord du climat de type méditerranéen pourrait à tout le moins amener la stabilisation, voire l'extension ou l'essaimage de ces microfoyers. Ce qui ne laisse plus la moindre place au doute, c'est que *la limite du 45ème parallèle, longtemps réputée infranchissable, est maintenant dépassée* – et pas seulement en France. Ainsi les Italiens, beaucoup plus préoccupés par ce risque que ne le sont les Français, notent dorénavant la présence de vecteurs potentiels jusqu'en Val d'Aoste, alors que le Piémont était totalement indemne de phlébotomes et de leishmaniose canine il y a moins de trente ans. Le même phénomène a été décrit en Belgique, en Suisse, en Allemagne et dans le nord de la Croatie, tandis qu'en Andalousie la limite altitudinale est récemment remontée aux environs de 950 mètres. Peu importe que les phlébotomes ainsi découverts hors de leur domaine traditionnel soient ou non porteurs de leishmanies ; ils le deviendront inévitablement à brève échéance au contact de chiens ayant séjourné plus au sud ou plus bas en altitude. Des modèles d'évolution climatique indiquent également la possibilité de foyers de leishmaniose viscérale jusque dans le sud du Royaume-Uni aux alentours de 2030.

D'autres effets du changement climatique peuvent également être suspectés. Avec quelques degrés de plus, non seulement les phlébotomes devraient vivre plus longtemps, mais leur saison d'activité s'allongerait, d'une part parce que le passage de l'état larvaire au stade adulte se ferait plus rapidement, d'autre part parce que la période de diapause hivernale, qui couvre couramment quatre à huit mois dans le Midi de la France, se réduirait. Un raccourcissement de la saison froide entraînerait ainsi un étalement vers l'automne de la période à risque. Le nombre annuel de générations passerait alors d'une à deux, voire trois. En outre, avec une élévation de la température, on peut s'attendre à un plus fort pourcentage de phlébotomes infectés, car les parasites se déplacent alors plus facilement vers l'avant du tube digestif de l'insecte, ce qui constitue une condition indispensable à leur transmission. Ainsi, alors qu'ils sont un peu plus de 10 % en Sardaigne, on considère habituellement que 4 % des phlébotomes sont potentiellement vecteurs de leishmanies dans les Alpes-Maritimes. Il suffirait que ce taux grimpe à 8 % pour que le nombre de cas de leishmaniose viscérale double dans la région niçoise. Il

reste toutefois des limites incontournables du côté de la chaleur : alors que le sud de la France connaît une seule période de transmission du parasite, en août-septembre, il en existe deux au Maghreb, l'une au printemps et l'autre en automne, séparées par une interruption au plus fort de l'été, où beaucoup de femelles meurent, tandis que les survivantes se mettent en estivation, forme de diapause symétrique de celle de l'hiver. Il est vraisemblable qu'en France, un réchauffement fort conduirait à un tel *dédoublement de la saison d'activité*, avec un ralentissement de la transmission.

Il y a donc dans certains pays un risque non négligeable d'amplification de la leishmaniose canine en relation avec le changement climatique. L'infection qui s'étend d'année en année chez le chien constitue une menace permanente pour l'homme. On se gardera bien entendu de dramatiser, mais l'apparition de souches de leishmanies résistant aux médicaments actuels pourrait, dans les années futures, donner naissance à un difficile problème de santé publique... Certes, comme dans le cas du paludisme, il faut éviter de tout rapporter à l'évolution du climat : le développement de la population canine, les changements de comportement des hommes, le développement de la périurbanisation, la fréquence accrue des contacts des citadins avec la nature, l'intensification des déplacements, y compris des déplacements de chiens, peuvent rendre compte d'une part appréciable de l'évolution que l'on vient de décrire sur les années récentes. Mais la différence fondamentale avec le paludisme, c'est que ces facteurs extraclimatiques semblent *incapables de tout expliquer* dans le cas des leishmanioses. Même si elle est difficile à évaluer, il reste une part indiscutable d'action du climat − et cette part pourrait s'accentuer dans l'avenir.

Il n'empêche que, dans les pays développés des latitudes moyennes, le risque infectieux et parasitaire demeure relativement marginal par rapport à l'action directe du climat sur l'organisme humain : c'est alors avant tout le *stress thermique* qui affecte les taux de morbidité et de mortalité, notamment mais pas exclusivement en ce qui concerne les maladies cardio-vasculaires et les affections des voies respiratoires. Corrélativement, le poids des variables d'ordre social et économique, à commencer par la capacité du système de santé à prévenir ou à traiter la maladie, a quelque peu tendance à diminuer. Mais le relais est pris par d'autres facteurs de risque, au premier chef le vieillissement de la population − ce qui fait que, là non plus, il ne faudra pas chercher à tout expliquer par l'état de l'atmosphère.

III. Les effets directs d'un réchauffement climatique sur la santé

Différentes simulations ont porté sur le nombre des décès. On sait que le rythme annuel de la mortalité, hors des tropiques, est le plus souvent caractérisé aujourd'hui par une culmination principale de saison froide (renforcée en présence d'un hiver rigoureux) et par un minimum de saison chaude (sauf en cas de canicule accentuée). Dans l'hypothèse d'une intensification de l'effet de serre, il faudrait s'attendre à une diminution relative de la surmortalité hivernale, les maladies de l'appareil respiratoire et les cardiopathies contribuant le plus à cette amélioration. À l'opposé, les nouvelles dispositions thermiques détermineraient une assez franche surmortalité estivale, moins du fait de la mise en échec absolue des mécanismes thermorégulateurs (hyperthermie, coup de chaleur, déshydratation aiguë) que par suite de la recrudescence de diverses maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, respiratoires, métaboliques ou psychiques. L'hypothèse privilégiée par la majorité des experts est en effet celle de vagues de chaleur à la fois plus fréquentes, plus intenses et plus longues. À partir de 2050, nous dit-on, « 2003, ce sera en gros un été sur deux ». Il faut dès lors s'attendre à ce que se reproduisent à intervalles rapprochés des crises sanitaires majeures, entraînant d'énormes surmortalités. Deux arguments font même redouter que la situation ne soit pire qu'en 2003 :

- D'une part, les plus fortes surmortalités se rencontrent toujours dans les grandes agglomérations urbaines. Or, la population est appelée à se concentrer de plus en plus dans les villes et l'on admet que, dès 2030, deux hommes sur trois, à la surface du globe, seront des citadins.

- Par ailleurs, les principales cibles des vagues de chaleur sont les personnes âgées. Or, le vieillissement de la population va immanquablement multiplier les sujets à très haut risque. Selon les projections les plus basses, le nombre de plus de 85 ans, qui ne dépassait pas 200 000 en 1950 et 1,2 million en 2003, atteindrait en France les 2 millions en 2020 et les 3 millions en 2035, pour plafonner entre 4,5 et 5 millions en 2050. Cela signifie que, du seul fait de l'évolution démographique, une canicule comparable à celle de l'été 2003 pourrait faire au milieu de ce siècle quatre fois plus de victimes − soit aux alentours de 60 000 !

Ainsi, même en l'absence de tout changement climatique, les vagues de chaleur de l'avenir sont appelées à devenir de plus en plus meurtrières. L'évolution du climat ne peut qu'accentuer la tendance, surtout que les températures nocturnes jouent un rôle décisif dans la tolérance aux canicules ; or, les modèles s'accordent à annoncer un relèvement particulièrement marqué des minima nocturnes. C'est dire s'il est urgent d'agir, avec la mise en place de « plans canicule » et de systèmes d'alerte performants.

Toute la difficulté reste néanmoins de savoir quelle serait alors la résultante des évolutions opposées caractérisant les saisons extrêmes (davantage de décès par forte chaleur en été, moins de décès par grand froid en hiver). En France, d'ici à 2050, si l'on extrapole les situations réalisées au cours des hivers les plus froids et des étés les plus chauds du dernier demi-siècle, le nombre des décès pourrait reculer d'entre 5 et 7 % au cours du trimestre décembre-février, alors qu'il augmenterait d'entre 12 et 18 % au cours des mois de juin à août. Toutes choses égales par ailleurs, l'évolution climatique se traduirait donc, dans une classe d'âge donnée, par un renforcement de la mortalité et par une diminution de l'espérance de vie. Seraient alors spécialement touchées les catégories sociales les moins favorisées (dépourvues de toute installation de conditionnement d'air et souffrant souvent de polypathologies intriquées), ainsi que les femmes (lesquelles, au-delà de la soixantaine, règlent moins efficacement que les hommes leur température interne). Aux États-Unis, où les contrastes thermiques saisonniers sont plus accusés, les simulations font état de répercussions encore plus préoccupantes, avec une surmortalité estivale trois fois plus forte que la sous-mortalité hivernale − ce qui se traduirait finalement par une inversion du rythme annuel avant le milieu du XXI^{ème} siècle. Mais il ne faut pas dissimuler que d'autres études, conduites avec la même rigueur, sont arrivées à une conclusion opposée, aux Pays-Bas ou en Australie. De telles contradictions tiennent, pour une part, à l'incertitude des modèles. Mais il est également vraisemblable que les répercussions d'un réchauffement climatique varieraient d'une région à l'autre. De plus, le développement de phénomènes d'adaptation (non seulement biologique, mais aussi technique, comportementale et sans doute culturelle…) est susceptible, sinon de neutraliser, du moins de ralentir une telle évolution. Les êtres humains s'adaptent en effet aux conditions climatiques de la région où ils vivent, et nous n'en voulons que deux preuves. En premier lieu, le seuil à partir duquel le nombre des décès grimpe en flèche ne dépasse pas 27,5°C en Belgique, mais atteint 41°C en Andalousie. En second lieu, à la surface du territoire français, le niveau de l'optimum thermique (c'est-à-dire de la température pour laquelle le nombre journalier de décès passe par son niveau le plus bas) s'élève à mesure que l'on a affaire à un climat habituellement plus chaud. Si un tel processus d'adaptation différentielle se poursuit en présence d'un réchauffement planétaire, les effets sanitaires du changement climatique auront toutes les chances de se trouver atténués.

En fait, *tout dépend de la brutalité avec laquelle s'opérerait le réchauffement*. Une évolution relativement lente, permettant une acclimatation progressive, n'aurait sans doute que peu de conséquences sur la mortalité. Mais si l'évolution se fait par à-coups relativement violents (et les simulations du climat au XXI^{ème} siècle ne l'excluent pas), les

conséquences risquent d'être nettement plus inquiétantes, quitte à ce que se réalise ensuite peu à peu le retour à un nouvel équilibre.

Parmi les pathologies les plus susceptibles de voir leur prévalence évoluer, dans un sens ou dans l'autre, à l'occasion d'un réchauffement du climat, on a déjà cité les maladies cardiovasculaires et cérébrovasculaires. Nombre d'études, sous les climats les plus variés, ont en effet établi que si l'occurrence de l'infarctus du myocarde et des accidents vasculaires cérébraux diminuait à mesure que les températures se faisaient plus clémentes, toutes ont noté que la tendance s'inversait brutalement en présence de fortes chaleurs. Le seuil thermique correspondant varie fortement d'un endroit à l'autre. Il est particulièrement bas dans les milieux polaires (14°C dans le nord de la Finlande). Il se situe au contraire à plus de 23°C dans de nombreuses villes méditerranéennes, et parfois beaucoup plus haut. Les maladies cardiovasculaires sont donc susceptibles de voir leur prévalence augmenter en été si les périodes caniculaires se font plus nombreuses et plus intenses. Toute la question est alors de savoir si, en terme de santé humaine, les bénéfices des hivers plus doux pourraient ou non surpasser le coût des étés plus chauds. On rejoint là le problème déjà évoqué à propos de la mortalité toutes causes. Les réponses apportées sont tout aussi divergentes d'un pays à l'autre, généralement positives en Angleterre, au Pays de Galles et en Australie, plutôt négatives aux États-Unis et dans les pays méditerranéens, mais dans tous les cas encore trop peu assurées pour nous autoriser à trancher…

Mais le climat peut aussi avoir des impacts variés sur l'appareil respiratoire. Là encore, le changement climatique amènerait sans doute le plus souvent une amélioration : les basses températures réduisent la résistance immunitaire face aux infections, tandis que la conjonction du froid et d'une faible charge en vapeur d'eau de l'air inhalé dessèche les muqueuses, tout en déclenchant une constriction des bronches, souvent à peine perceptible chez les sujets sains, mais très marquée en cas de bronchopneumopathie chronique obstructive, par exemple chez les gros fumeurs. Mais le phénomène inverse peut s'observer lors de situations fortement caniculaires. De surcroît, une recrudescence printanière et/ou estivale des crises d'asthme est à craindre à la suite d'un accroissement de la pollution atmosphérique, difficilement évitable en présence d'un réchauffement climatique de grande ampleur. La question se pose principalement pour les polluants photochimiques, comme l'ozone, qui se forment à partir de divers précurseurs, en présence du rayonnement solaire. Si l'on a peine à trancher pour les latitudes plus élevées, il semble acquis qu'à l'avenir les pays méditerranéens et, éventuellement, leurs marges bénéficieront d'un plus fort ensoleillement estival, favorisant la production de plus grandes quantités de ce gaz. Il semble en outre que différents polluants agissent en synergie. Ils sont également capables de préparer et de renforcer l'action d'autres facteurs déclenchants de l'asthme, tels que divers allergènes.

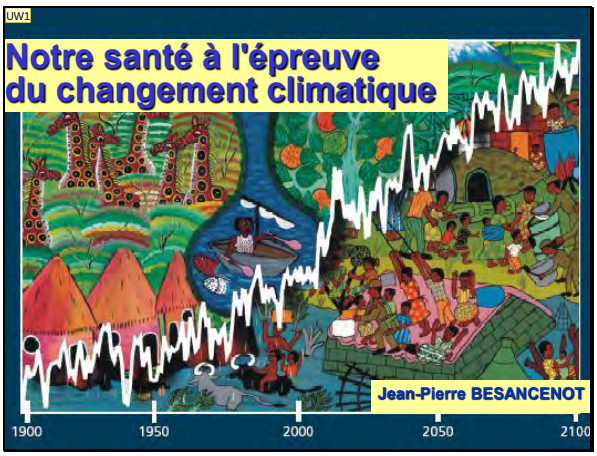
Parmi les « nouveaux » dangers potentiellement dus au changement climatique, les allergies, et plus spécialement celles qui sont liées aux pneumallergènes, suscitent de légitimes inquiétudes − et pas seulement pour un avenir lointain. D'ores et déjà, les maladies allergiques flambent. Depuis le milieu des années 1990, pour les principales espèces allergisantes, la saison des pollens et, par suite, la saison des pollinoses s'étendent sur une plus longue durée. Même si le temps de réponse de la végétation est lent, pour les arbres plus encore que pour les herbacées, une hausse des températures pourrait aussi amener le déplacement de l'aire de répartition de nombreuses espèces, dont certaines fortement allergisantes, tandis que la fréquence accrue du beau temps chaud, ensoleillé et exempt de fortes précipitations augmenterait les quantités de pollen libérées dans l'air.

On signalera encore, sans viser l'exhaustivité, les présomptions qui pèsent sur une possible augmentation de la prévalence des lithiases urinaires, sur une élévation sensible du taux de prématurité avec un renforcement corrélatif du taux de mortalité périnatale, sur une recrudescence des admissions en urgence dans les services de psychiatrie, sur une multiplication des intoxications (du fait de la mauvaise conservation des aliments),

ou encore sur un risque accru de contamination des systèmes de climatisation et/ou d'humidification par des micro-organismes variés, notamment la redoutable légionelle.

Conclusion

Rien ne permet d'affirmer que l'évolution se fera bien dans le sens annoncé, tant les incertitudes sont encore nombreuses et, pour certaines, difficilement réductibles. Plus on en sait, plus on découvre notre ignorance. L'essentiel est donc de toujours relativiser nos conclusions. Par ailleurs, ce serait une erreur que de considérer isolément les effets potentiels de l'évolution du climat, hors de tout contexte : les variables météorologiques ne suffisent pas à cerner les risques météoropathologiques et une même agression climatique n'est pas ressentie de la même façon dans différents milieux économiques ou culturels. Pour prendre un exemple caricatural, la situation du paludisme pourrait se trouver radicalement transformée par la mise au point d'un vaccin bon marché et durablement efficace. Plus largement, les progrès réalisés dans la prévention et/ou le traitement des maladies ont des chances d'annihiler les effets nocifs que l'on a signalés. À l'inverse, il faut toujours garder présent à l'esprit que l'élévation de la température peut exacerber les effets associés de la pollution de l'air et, par suite, intensifier les problèmes sanitaires des groupes humains les plus vulnérables. Il convient en outre de rester attentif au fait que, si nous devons connaître un changement climatique, celui-ci aura une forte probabilité de s'accompagner d'une recrudescence des événements extrêmes. Or, ces grands paroxysmes météorologiques peuvent avoir de multiples répercussions sur la santé, par leurs effets traumatiques immédiats mais aussi par les épidémies susceptibles de se déclencher à leur suite et par la pathologie de stress qui s'inscrit durablement dans leur sillage. Là encore, le contexte aura son importance : ainsi, les épidémies seraient rapidement jugulées dans les pays riches, si tant est qu'elles s'y déclenchent, mais leur bilan pourra être catastrophique dans les pays les plus démunis… En somme, on n'oubliera jamais qu'une dégradation de l'état de santé résulte toujours de la convergence d'un aléa exogène et d'une particulière vulnérabilité de la population exposée. La prudence reste donc le maître-mot. Mais prudence ne doit pas être synonyme de passivité car, si l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare. Un renforcement de la surveillance épidémiologique s'impose si l'on veut être en mesure de réagir lorsqu'il en est encore temps.



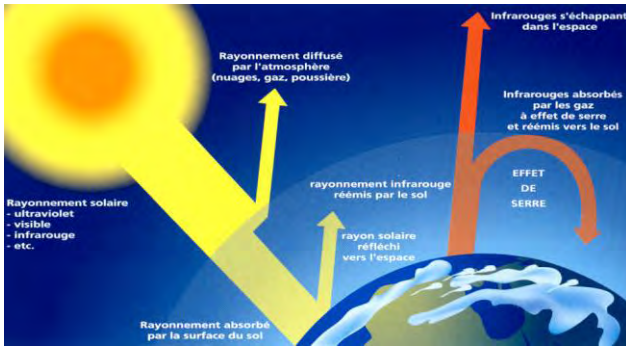
- Le changement climatique
- Ses répercussions possibles sur la santé
- Conclusion … très provisoire

Le climat

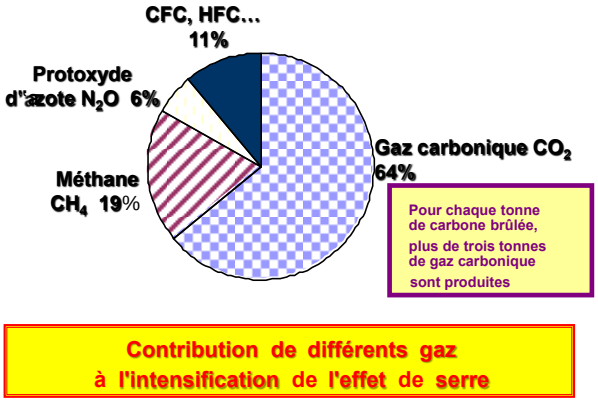
✓ **Variabilité** naturelle **aléatoire**
+ variabilité tendancielle lente (millénaires) et modérée (4 à 5°C d'écart entre glaciaires et interglaciaires)

✓ **Action** anthropique ↯ **variation rapide (décennies) et forte**

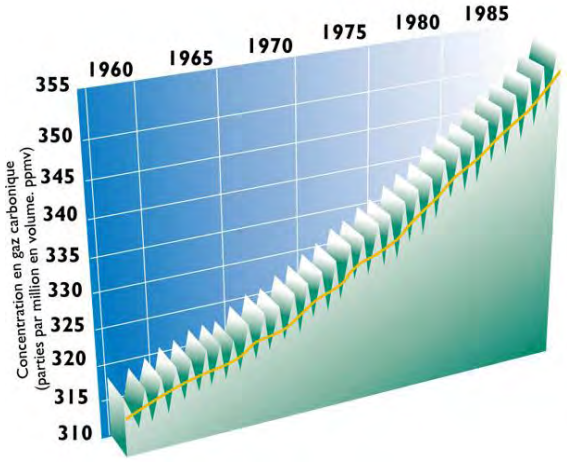
⇨ **intensification de l'**effet de serre



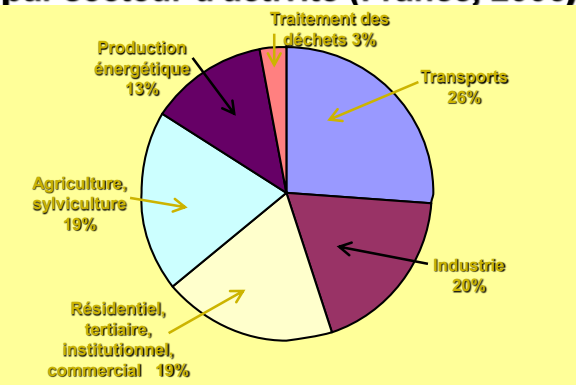
Sans l'effet de serre, la température moyenne serait de -18°C au lieu de +15°C



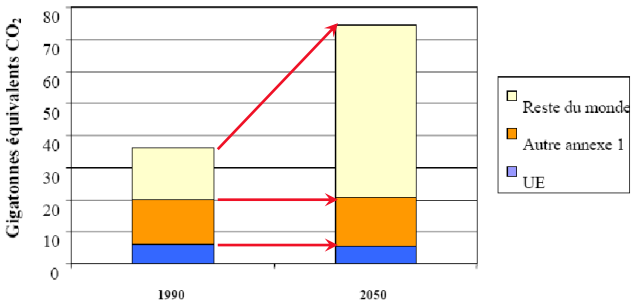
Contribution de différents gaz à l'intensification de l'effet de serre



Emissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité (France, 2006)



Prévision d'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans différentes régions du monde, 1990-2050



Effet de serre additionnel et changement climatique

- ✓ **1896 : problème soulevé pour la première fois (Arrhénius)**
- ✓ **1967 : +2,5°C d'ici à l'an 2000**
- ✓ **1972 : les travaux se multiplient**
- ✓ **1979 : 1ère Conférence Mondiale sur le Climat (Genève) = *« Il serait prématuré de faire quoi que ce soit »***
- ✓ **1992 : Sommet de la Terre (Rio)**
- ✓ **1997 : protocole de Kyoto**

Le protocole de Kyoto (1997)

- ✓ **L'accord prévoit, pour la période 2008-2012, que les pays industrialisés ramènent en moyenne leurs émissions de gaz à effet de serre à** 5,2% au-dessous du niveau de 1990
- ✓ **Les exigences sont fortement modulées suivant les pays, en fonction de leurs capacités technologiques et financières (-28% pour le Luxembourg, -21% pour l'Allemagne et le Danemark, -12,5% pour le Royaume-Uni, -6,5% pour l'Italie, etc., alors que la France doit simplement revenir au niveau de 1990, et que l'Espagne et le Portugal ont obtenu l'autorisation de dépasser ce niveau, respectivement, de 15 et de 27%)**

- ✓ **Le protocole ne pouvait s'appliquer que s'il était ratifié par un nombre suffisant de pays (55), responsables de 55% des émissions mondiales**
- ✓ **Les** États-Unis **et l'Australie ont refusé de signer**
- ✓ **Automne 2004 : signature de Vladimir Poutine**
- ✓ **16 février** 2005 **: le protocole entre en vigueur (175 pays l'ont ratifié, dont 36 pays industrialisés)**
- ✓ **De 2000 à 2005, les émissions de gaz à effet de serre par les pays industrialisés ont** augmenté **de 2,6%**

- ✓ **En Europe, les "mauvais élèves" sont l'Espagne (+53%), le Portugal (+43%) et l'Irlande (+26%) ; les meilleures performances sont obtenues par l'Allemagne (-18,4%) et le Royaume-Uni (-14,8%) ; la France a réduit ses émissions de 1,6%. Hors d'Europe, le Japon a connu une augmentation de 6,9%, les États-Unis de 16,3%, le Canada de 25,3%, l'Australie de 25,6% et la Chine (hors Kyoto) de 80%...**
- ✓ **Sauf exceptions,** les objectifs fixés ne seront pas atteints
- ✓ **Le plus grand flou règne sur les engagements qui pourraient être pris pour** la période postérieure à

La conférence de Bali (décembre 2007)

- ✓ L'après-Kyoto
- ✓ « Les pays riches doivent s'engager plus fortement »
- ✓ L'Australie a ratifié le protocole de Kyoto, la Chine et les Etats-Unis ont promis de faire preuve d'ouverture et de flexibilité
- ✓ Près de deux cents pays sont convenus de lancer de nouvelles négociations pour parvenir d'ici fin 2009 (Copenhague) à un nouveau traité encadrant la lutte contre le réchauffement climatique

aucun engagement chiffré

L'évolution est inéluctable

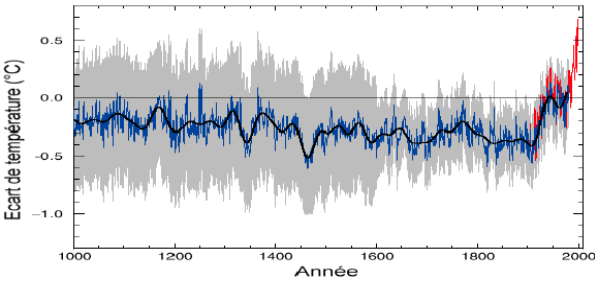
- ✓ D'une part, les émissions de gaz à effet de serre des deux derniers siècles n'ont pas encore produit leur plein effet sur le climat, à cause de l'inertie de l'atmosphère et de la « durée de vie » de nombreux gaz à effet de serre
- ✓ D'autre part, nos structures économiques et sociales ne peuvent pas être bouleversées du jour au lendemain, sinon les perturbations seraient au moins aussi graves que celles dues au climat

  ⇨ Les hommes continueront à émettre en abondance des gaz à effet de serre pendant plusieurs décennies, même s'ils réduisent peu à peu leurs émissions

Un réchauffement est-il amorcé ?

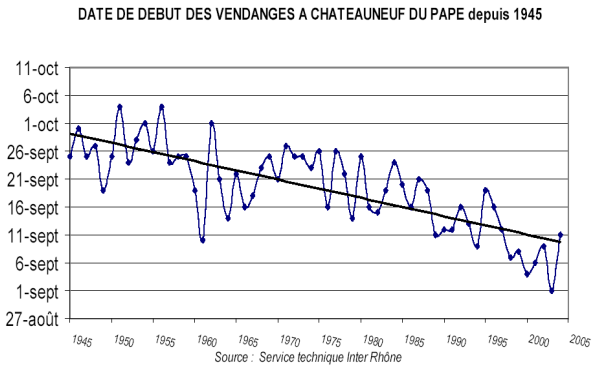
Un réchauffement est-il amorcé ?

- ✓ XX^{ème} siècle : le siècle le plus chaud du millénaire
- ✓ 1901-2005 : 0,74°C ± 0,2°C
- ✓ Douze des treize dernières années ont été plus chaudes que toutes celles qui les avaient précédées depuis le début des observations météorologiques
- ✓ Records : 1998, 2005, 2002, 2003, 2007, 2004, 2006…



Le glacier de l'Argentière, au-dessus de Chamonix, en 1864

Le glacier de l'Argentière, au-dessus de Chamonix, en 1995



Les prévisions du GIEC

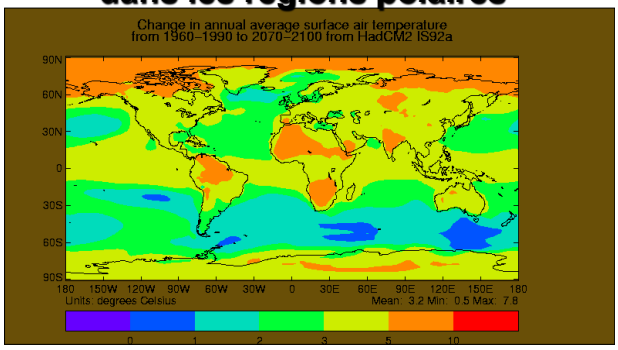
- ✓ 2ème Rapport (1995) : élévation de 1,0 à 3,5°C d'ici à 2100
- ✓ 3ème Rapport (2001) : élévation de 1,4 à 5,7°C d'ici à 2100
- ✓ 4ème Rapport (2007) : élévation de 1,1 à 6,4°C d'ici à 2100

1°C = déplacement d'environ 200 km vers le pôle
remontée d'environ 150 m en altitude

Réchauffement ou dérèglement climatique ?

- ✓ Un réchauffement ne serait uniforme ni dans le temps ni dans l'espace

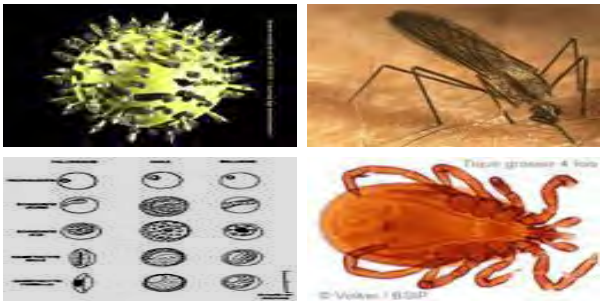
Prévisions climatiques (GIEC…) : réchauffement fort et rapide dans les régions polaires



Réchauffement ou dérèglement climatique ?

- ✓ Un réchauffement ne serait uniforme ni dans le temps ni dans l'espace
- ✓ Il n'exclurait pas des refroidissements en certains endroits
- ✓ L'élévation "moyenne" de la température ne serait pas le seul effet, il s'accompagnerait probablement d'une fréquence et d'une intensité accrues des événements extrêmes (paroxysmes météorologiques)

- La santé humaine est sous la dépendance du contexte climatique
- Si le climat change (et il va changer), cela aura des répercussions sur la santé
- Effets directs d'un réchauffement planétaire sur le fonctionnement de l'organisme humain
- Et effets indirects sur le façonnement de conditions écologiques plus ou moins favorables à la survie, à la multiplication et au développement de tel ou tel micro-organisme pathogène, ou de tel ou tel vecteur de ce microorganisme



- Modification de la répartition spatiale du vecteur, qui « remonte » vers le nord, « descend » vers le sud ou grimpe en altitude
- Modification de la densité du vecteur
- Allongement ou raccourcissement de l'incubation extrinsèque
- Allongement ou raccourcissement de la durée de vie du vecteur
- Action sur la fréquence des repas sanguins, sur la production d'œufs, sur les contacts écologi-ques entre populations, etc.

Y a-t-il des risques que des vecteurs d'origine tropicale ou subtropicale colonisent des zones tempérées ?

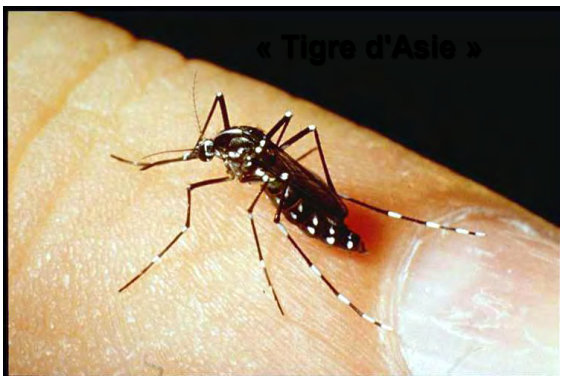
Pour qu'un tel phénomène survienne, deux conditions devraient être simultanément réunies :

1) que les vecteurs se déplacent

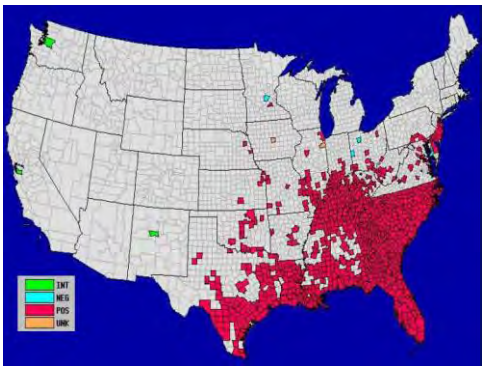
2) que les conditions locales soient favorables à leur installation

Or, les arthropodes vecteurs voyagent**. Ils peuvent aussi s'installer dans le cas de** migrations Sud-Sud**, ou Nord-Nord, voire Nord-Sud ; mais on n'a peu d'exemples d'adaptation massive à l'hiver de la part de vecteurs originaires des tropiques**

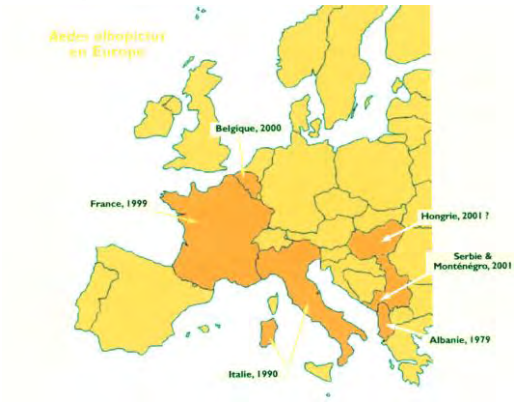
Aedes albopictus



✓ **Aux États-Unis**

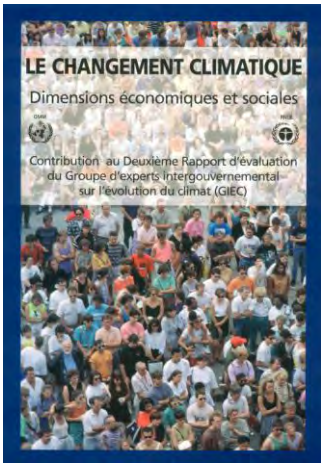


✓ **En Europe**



Pourquoi cette dissémination d'*Aedes albopictus* ?

✓**Changement climatique ?**



✓ **Stocks de pneus ?**

✓ **Risque sanitaire ?**

✓ **Nuisance certaine**

L'exemple du paludisme

✓ **Chiffres "officiels" : 100 à 120 millions d'hommes à travers le monde présentant chaque année un paludisme clinique**

✓ **La réalité (???) : 500 millions de cas cliniques sur un milliard de personnes infectées**

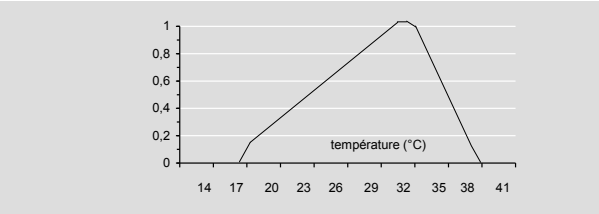
✓ **1,5 à 3 millions de décès par an, en majorité de jeunes enfants africains ⇨ l'une des premières causes de mortalité à la surface du globe**

- Le paludisme est dû à un parasite hématozoaire du genre Plasmodium, transporté dans la salive du moustique anophèle femelle

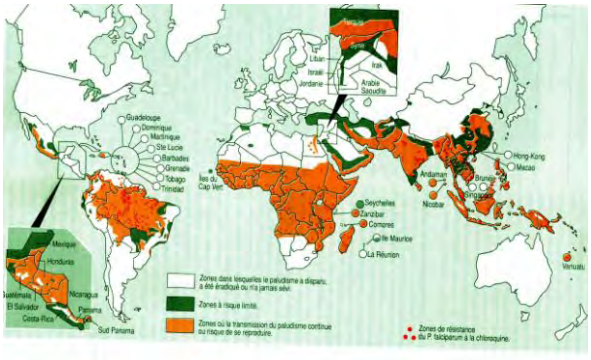
- Les anophèles prolifèrent en ambiance chaude et humide
- Ils se reproduisent à proximité de l'eau, notam-ment dans les zones marécageuses et les mares, la plupart des espèces préférant les eaux stagnantes aux eaux courantes

- La durée de l'incubation dépend de l'espèce et de la souche de l'hématozoaire ainsi que de l'espèce et de la souche du moustique, mais aussi des conditions thermiques (à 25°C, le développement se fait en 10 à 13 jours ≠ 14 à 18 à 22°C) et de l'humidité ambiante (qui commande la longévité de l'anophèle, laquelle doit être suffisamment prolongée pour qu'il devienne infectant)
- Le réchauffement pourrait augmenter le niveau de transmission en un lieu donné et permettre la transmission dans des régions où elle n'était auparavant pas possible (tempéra-ture < 16 ou 18°C)

Potentiel épidémique du paludisme en fonction de la température (1 = maximum)



Le paludisme dans le monde en 1997



- ⇨ extension en latitude de la zone d'endémie palustre, à la fois vers le nord et vers le sud
- ⇨ extension en altitude
- En 1990, 45% de la population mondiale vivait dans une zone à risque de paludisme ; dans un siècle, 60% (??)
- L'évolution est-elle déjà engagée ? Certains l'affirment, mais les exemples ne sont guère probants, et c'est une erreur méthodologique que de séparer la température des autres éléments qui conditionnent la transmission du paludisme

✓ **Au-dessus de 1000 m sur les hautes terres malgaches, épidémie meurtrière en 1987 dans un secteur où le paludisme était éradiqué depuis 1962 :**

- la température n'a pas varié durant ces vingt-cinq ans

- mais, dans un contexte de crise économique sévère, la lutte antivectorielle s"est relâchée et les distributions de chloroquine ont cessé (+ perte de toute immunité)

✓ **Terrible épidémie en 1994 au cœur du pays kiga (montagnes du sud-ouest de l'Ouganda, autour de Kabale) :**

- la température a augmenté de 0,4 à 0,6°C en trente ans

- les effectifs de la population ont plus que triplé ➢ les papyrus qui occupaient jusque-là les fonds de vallée ont été détruits ; or, ils sécrètent une huile essentielle qui forme un film à la surface de l'eau, empêchant la présence de moustiques...

Et en Europe occidentale ?

- Situation actuelle : anophélisme sans paludisme
- Le climat n'est pas le facteur limitant
- Seul un apport massif de parasites, d'une souche compatible avec les populations anophéliennes locales, pourrait entraîner une reprise de la transmission
- Une réintroduction de la maladie serait sans doute facilement détectée, circonscrite et maîtrisée

Résurgences du paludisme épidémique dans les années 1990

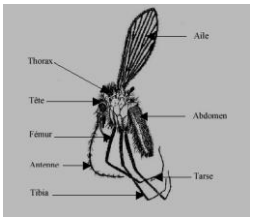
- Arménie
- Turquie
- Azerbaïdjan
- Tadjikistan
- Turkménistan
- Daghestan (Fédération de Russie)
- Géorgie
- Kazakhstan
- Kirghizistan
- Ouzbékistan

- ✓ **L'impact du paludisme et l'efficacité des moyens de lutte restent étroitement liés au niveau socio-économique des populations**
- ✓ **L'avenir ne doit pas s'envisager seulement à travers le prisme du réchauffement planétaire, mais à travers l'ensemble de l'écosystème pathogène**

  ⇨ **Faux problème dont on parle beaucoup, alors qu'il est sans doute de vrais problèmes dont on parle peu**

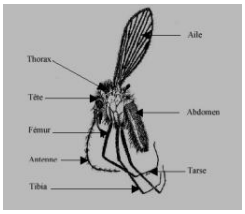
Les leishmanioses

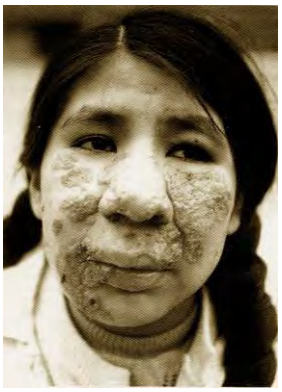
- Maladies parasitaires communes à l'homme et à certains animaux, transmises par la piqûre des phlébotomes femelles



Les leishmanioses

- Maladies parasitaires communes à l'homme et à certains animaux, transmises par la piqûre des phlébotomes femelles
- Prévalence mondiale de l'ordre de 12 millions, dans 88 pays
- Deux formes majeures :
- - Leishmaniose cutanée (réservoir principal : les rongeurs)
-



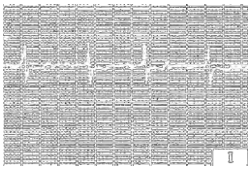


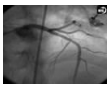
Les leishmanioses

- Maladies parasitaires communes à l'homme et à certains animaux, transmises par la piqûre des phlébotomes femelles
- Prévalence mondiale de l'ordre de 12 millions, dans 88 pays
- Deux formes majeures :
- - Leishmaniose cutanée (réservoir principal : les rongeurs)
- - Leishmaniose viscérale (réservoir principal : le chien domestique), fréquente sur le pourtour méditerranéen, en progression rapide dans le cadre de co-infections VIH-leishmaniose

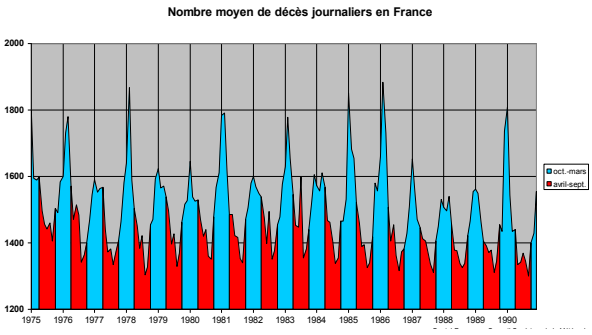
- Le climat peut modifier :
- la distribution des phlébotomes en latitude et en altitude (maximum actuel à 800 m dans le Midi de la France)
- leur densité
- leur longévité
- ↳Hier : Cévennes + Marseille + Alpes-Maritimes + Corse
- Aujourd'hui : triangle Andorre-Lyon-Nice
- (+ vallée de la Loire + Limoges)
- Demain : ???

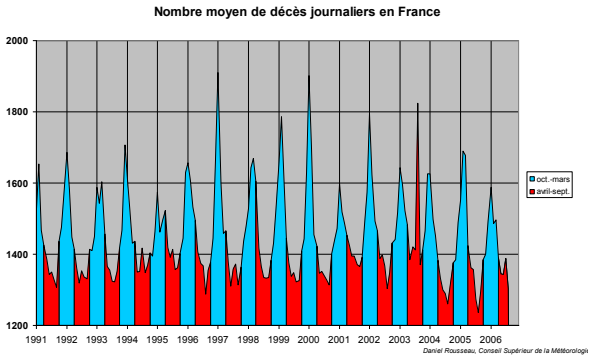
Les effets directs d'un réchauffement planétaire sur la santé





Le rythme annuel de la mortalité : aujourd'hui, maximum principal de saison froide, minimum de saison chaude



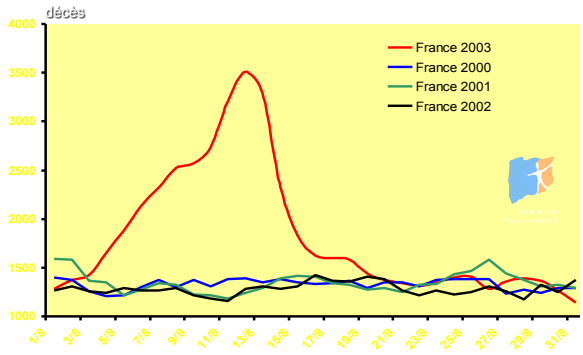


Les effets sur la santé des vagues de froid en hiver

- Janvier-février 1985
- La presse : « 57 morts de froid »
- En fait, 9 000 décès surnuméraires (+12%)
- - maladies cardiovasculaires + 19%
- - bronchites + 50%, pneumonies + 200%...
- si l'hiver se réchauffe, de telles hécatom-bes deviendront plus rares

Les effets sur la santé des vagues de chaleur en été

- Marseille, juillet 1983 : 300 morts
- Athènes, juillet 1987 : plus de 2 000 morts
- France, août 2003 : 14 802 morts (+ 55%)
- chiffre ultérieurement relevé à 14 947



Le Monde

Canicule : une catastrophe humanitaire

La France en état de choc sanitaire

Canicule: l'échec du système

Des vacances qui ont tué

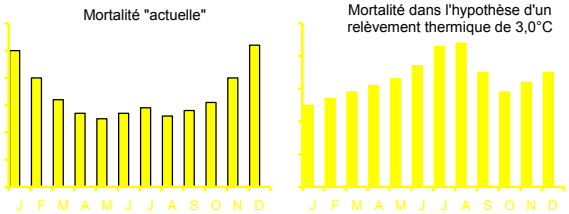
L'été le plus meurtrier en France depuis la Libération

Le Monde 10/9/03

Les effets sur la santé des vagues de chaleur en été

- Marseille, juillet 1983 : 300 morts
- Athènes, juillet 1987 : plus de 2.000 morts
- France, août 2003 : 14 802 morts (+ 55%)
- chiffre ultérieurement relevé à 14 947
- si l'été se réchauffe, de telles hécatom-bes deviendront plus fréquentes

Évolution "attendue" du rythme saisonnier de la mortalité en France en cas de réchauffement



- ✓ **Mais quelle serait la résultante des évolutions opposées caractérisant les saisons extrêmes ?**
- ✓ **En fait, tout dépend de la** brutalité **avec laquelle s'opérera le réchauffement**

↳ adaptation

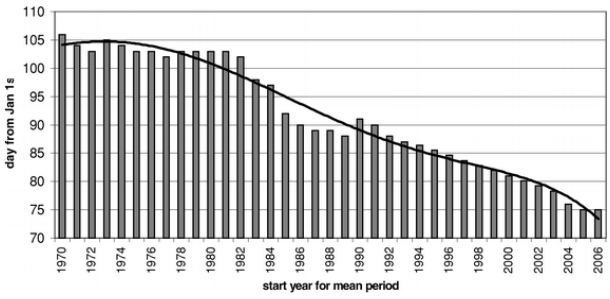
Le seuil thermique au-dessus duquel le nombre des décès grimpe en flèche est plus élevé dans les climats chauds

- ✓ **Bruxelles 27,5°C**
- ✓ **Paris 31,0°C**
- ✓ **Toulouse 38,0°C**
- ✓ **Séville 41,0°C**

Les principales maladies concernées

- ✓ **Maladies cardiovasculaires et cérébrovasculaires**
- ✓ **Affections respiratoires (recrudescence estivale des crises d'asthme)**
- ✓ **Augmentation de la prévalence des lithiases urinaires**
- ✓ **Élévation sensible du taux de prématurité et augmentation corrélative du taux de mortalité périnatale**
- ✓ **Recrudescence des admissions en urgence dans les services de psychiatrie**
- ✓ **Risque de contamination des systèmes de climatisation et/ou d'humidification par des micro-organismes variés (légionelles)**
- ✓ **Augmentation des** risques allergiques

Dates de début de pollinisation du bouleau à Bruxelles



(d'après J. Emberlin *et al.*)

En guise de conclusion … provisoire

- ✓ **On ne saurait dissimuler l'immensité de notre ignorance**
- ✓ **Rien ne permet d'affirmer que l'évolution se fera bien dans le sens annoncé**
- ✓ **Il importe de toujours relativiser nos conclusions, sans céder au catastrophisme à la mode**
- ✓ **Ce serait une erreur que de considérer isolément les effets potentiels de l'évolution du climat, hors de tout contexte**

Le vieillissement de la population en accroîtra la vulnérabilité face au climat

Projections démographiques pour la France (INSEE/INED) : nombre de sujets de 85 ans et plus

1950 : 200 000
2003 : 1,2 million
2020 : 2,1 millions
2035 : 3,0 millions
2050 : 4,5 à 5 millions (?)

En guise de conclusion … provisoire

- ✓ On ne saurait dissimuler l'immensité de notre ignorance
- ✓ Rien ne permet d'affirmer que l'évolution se fera bien dans le sens annoncé
- ✓ Il importe de toujours relativiser nos conclusions, sans céder au catastrophisme à la mode
- ✓ Ce serait une erreur que de considérer isolément les effets potentiels de l'évolution du climat, hors de tout contexte
- ✓ **Les variables météorologiques ne suffisent pas à cerner les risques pour la santé**

⇩ PRUDENCE

… Mais si l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare

- " Nous sommes condamnés à vivre dans l'incertitude, ce qui ne signifie pas que nous devions nous contenter de l'ignorance "
- Robert KANDEL

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes : à quoi devons-nous nous préparer ?

Dounia BITAR, Didier CHE, Jean-Claude DESENCLOS

Institut de Veille Sanitaire,
Département des Maladies Infectieuses

InVS, 12 rue du Val d'Osne
94415 St Maurice cedex
Tél. 33 1 41 79 68 24
E.mail : d.bitar@invs.sante.fr

1. Introduction

Malgré un déclin annoncé des maladies infectieuses vers les années 1970, les maladies infectieuses continuent de peser lourdement sur la santé des populations. En parallèle de nombreuses infections émergentes sont survenues, engendrant parfois des crises sanitaires d'ampleur mondiale : VIH, maladies à prions, SRAS, Chikungunya, grippe aviaire, augmentation d'infections survenant dans le milieu de soins et de souches résistantes aux anti-infectieux… Les déterminants de la survenue de ces phénomènes sont complexes, intriqués et résultent de nouvelles interactions entre l'agent, son réservoir naturel, son environnement et l'hôte humain [1;2] : déséquilibre sociodémographique lié à l'accroissement de l'urbanisation, des migrations et des voyages internationaux ; perturbations de l'écosystème modifiant l'équilibre entre espèces animales et provoquant une extension de l'habitat humain vers des zones forestières ou inondables ; extension et modifications des méthodes d'élevage provoquant une densité accrue des contacts entre espèces animales et humaines ; modifications climatiques… Par ailleurs l'utilisation des anti-infectieux en santé humaine et animale, pas toujours rationnelle, contribue à sélectionner des agents devenus résistants. Ces derniers prennent le dessus sur les agents sensibles, générant l'émergence d'infections de plus en plus difficiles à traiter.

Pour anticiper et analyser l'émergence des phénomènes infectieux afin de mettre en place des mesures de prévention et de contrôle, il importe de tenir compte de la dynamique de ces interactions. Par exemple, si le réchauffement du milieu marin favorise la prolifération de vibrions, l'extension d'une épidémie de choléra dépend également de l'environnement sociodémographique (urbanisation massive, conditions d'hygiène et d'assainissement précaires) et de la capacité du système de santé à mettre en place les mesures de contrôle pour limiter la diffusion d'une épidémie. De ce fait, la notion du rôle de l'environnement dans l'émergence des maladies infectieuses recouvre un champ à la fois vaste et complexe.

Définition des phénomènes infectieux émergents

Pour l'Organisation Mondiale de la Santé [3] il s'agit de "maladies causées par des infections nouvelles et auparavant inconnues, représentant un problème de santé publique au niveau local ou international", les maladies ré-émergentes étant "causées par la résurgence ou l'augmentation d'infections connues, mais qui n'étaient plus considérées comme un problème de santé publique en raison de leur faible importance". Le Royaume-Uni considère depuis 2005 une maladie infectieuse émergente comme "une entité clinique d'origine infectieuse nouvellement identifiée ou une pathologie infectieuse connue dont l'incidence a augmenté dans un endroit donné ou dans un groupe de population donné" [4].

En France, un groupe multidisciplinaire de chercheurs et d'experts réunis au sein de la cellule de coordination sur les maladies infectieuses émergentes (créée en 2006 par le Ministère chargé de la Recherche, suite à l'épidémie de Chikungunya à La Réunion) propose la définition suivante [5]: "Un phénomène infectieux (ou présumé tel) inattendu, en référence à ses propriétés intrinsèques ou aux connaissances de sa biologie touchant l'homme, l'animal ou les deux. Il peut s'agir d'une entité clinique d'origine infectieuse nouvellement apparue ou identifiée, d'une entité pathologique infectieuse connue dont l'incidence augmente dans un espace ou dans un groupe de population donné ou d'une modification qualitative et/ou quantitative des caractéristiques de l'agent, de la maladie ou de la population touchée et de son environnement. Dans une optique d'anticipation, il peut s'agir d'une maladie identifiée dont les conditions d'expansion deviennent favorables. Habituellement, une incertitude réelle ou perçue quant au potentiel évolutif,

la maîtrise du phénomène et l'impact en santé publique humaine et/ou animale est présente".

Cette définition intègre une dimension qualitative impliquant le contexte et les perceptions sociales du risque, nécessitant *de facto* une approche multidisciplinaire pour appréhender ces phénomènes "émergents" dans toutes leurs dimensions.

L'interaction agent – hôte – environnement

3.1. Hôte

Outre les facteurs intrinsèques liés à la santé de l'individu (son âge, son origine géographique, ses maladies intercurrentes), son comportement, son mode de vie jouent également un rôle important dans la diffusion de certaines pathologies. Une réémergence de lymphogranulomatose vénérienne (LGV) a été ainsi identifiée en France avec 142 cas de LGV rectale entre 2002 et 2005 parmi des patients tous masculins dont l'âge moyen était de 38,5 ans, avec une proportion importante de sujets infectés par le VIH [6]. En parallèle, les Pays-Bas, qui avaient les premiers dépisté des cas similaires, déclaraient 136 cas. La notification des premiers cas de LGV rectale en Allemagne, au Royaume-Uni et en Espagne durant le second semestre 2004 confirmait la diffusion de l'infection dans la communauté homosexuelle d'Europe occidentale, liée à la baisse des mesures de prévention dans cette communauté.

Le système de santé crée paradoxalement un environnement propice aux émergences. Le milieu de soins concentre en effet un nombre important de populations particulièrement vulnérables du fait de leur âge, de maladies intercurrentes, de traitements immunosuppresseurs, etc… Ces populations fragilisées sont exposées à des germes parfois hautement pathogènes, ou résistants aux anti-infectieux habituels.

3.2. L'agent infectieux

L'émergence peut être le fait de l'apparition d'agents pathogènes auparavant inconnus ou non identifiés, comme le VIH, le variant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, les infections à virus Nipah ou Hendra, etc... L'apparition n'est pas nécessairement bruyante, spectaculaire comme l'a été le SRAS : avant la découverte du virus de l'hépatite C (VHC) en 1989, le corps médical identifiait comme "hépatite non-A, non-B" des infections dues au VHC ; en reconstituant l'incidence de l'infection par modélisation, Deuffic et al. [7] ont estimé que les premières infections à VHC en France ont pu survenir dès les années 1940.

L'apparition et l'installation de nouvelles souches pathogènes d'un germe connu sont également fréquentes. C'est le cas des épidémies d'infections à méningocoque W135 en Europe [8]. La souche a été introduite en Europe vers les années 1980 à partir de l'Afrique subsaharienne, introduction facilitée par les retours de pèlerinage de La Mecque.

L'administration répétée d'antibiotiques chez l'homme ou l'animal crée une pression de sélection qui favorise l'acquisition et la dissémination de souches particulièrement virulentes et/ou résistantes aux antibiotiques. L'épidémie d'infections nosocomiales à *Clostridium difficile* dans le Nord de l'Europe et la France [9;10] illustre cette problématique.

Les réservoirs animaux des germes sont importants à connaître et surveiller, en raison de la part importante des zoonoses dans la survenue d'infections émergentes chez l'homme. Woolhouse et Gowtage-Sequeria [11] ont répertorié 1407 agents pathogènes pour l'homme, dont 177 (13 %) considérés comme des agents émergents, parmi lesquels 75 % étaient d'origine animale. Le franchissement de la barrière d'espèces suivi de l'adaptation de l'agent pathogène à l'homme suit un processus complexe et particulier à chaque agent, qui n'est pas toujours facile à élucider [12-14].

3.3. L'environnement

Un grand nombre de modifications environnementales qui jouent un rôle dans la survenue des infections émergentes sont causées par l'homme : industrialisation, extension de l'habitat au-delà de zones géographiques habituelles, déforestation, etc... Les modifications écologiques des habitats respectifs et la ***densité accrue des contacts entre l'animal et l'homme*** augmentent le risque d'émergence des zoonoses, comme décrit avec l'extension des infections à Hantavirus aux Etats-Unis [15].

Les processus de ***production alimentaire*** associés à des modifications de comportement alimentaire peuvent également favoriser l'émergence de souches pathogènes pour l'homme [16]. Douze cas de neuropathies inflammatoires périphériques (paralysies ou déficits moteurs) ont été récemment décrits parmi des travailleurs en abattoirs de porcs aux Etats-Unis [17]. L'investigation a montré que les porcs étaient abattus par injection d'air comprimé dans la boite crânienne, permettant d'extirper plus facilement la cervelle. La méthode générait des gouttelettes pouvant contenir du matériel neurologique inhalé par les travailleurs. Ces derniers bénéficiaient de protections incluant des gants, lunettes, sur-blouses, bottes mais avec une utilisation irrégulière de ces dispositifs. Dès le début de l'investigation, la technique était suspendue. En France, cette situation a conduit les autorités sanitaires à vérifier si une pratique similaire était utilisée dans certains abattoirs et à rappeler l'importance des mesures de protection. L'étiologie de ce phénomène ne serait pas infectieuse ; il pourrait s'agir d'un phénomène immunologique lié au contact avec la myéline des porcs, substance fortement immunogène.

La ***mondialisation joue un rôle amplificateur*** : diffusion rapide d'un germe d'un point à l'autre du globe (SRAS) ou introduction d'espèces animales dans un nouvel environnement. Une épidémie de monkey pox (infection à orthopoxvirus) est ainsi survenue aux Etats-Unis en 2003 [18]. Le germe a été introduit par des rongeurs importés d'Afrique, maintenus pendant quelques semaines dans des animaleries à proximité de chiens de prairie, petits rongeurs autochtones vendus comme animaux de compagnie. Infectés, ces chiens de prairie ont été vendus dans plusieurs états, provoquant l'infection de 72 personnes (transmission par contact direct rongeur-humain). Les importations illicites d'animaux divers et les contacts avec les "nouveaux animaux de compagnie" comme furets, rats, etc... sont de plus en plus fréquents et difficiles à maîtriser.

En raison du rôle du ***réchauffement climatique*** dans l'émergence des maladies infectieuses [2;19], un recensement des impacts sanitaires potentiels du changement climatique a été initié en France à la demande du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire [20]. L'élargissement des écosystèmes favorables au développement d'insectes vecteurs peut provoquer l'extension de la dengue, du paludisme ou, plus proche de la métropole, de la leishmaniose cutanée. L'extension de la zone de circulation d'oiseaux migrateurs porteurs du virus du West Nile, combinée avec la prolifération des insectes vecteurs, peut entraîner une extension du foyer camarguais et méditerranéen vers le nord. Le réchauffement climatique fait craindre la recrudescence des toxi-infections alimentaires par mauvaise conservation des aliments, le développement des légionelloses liées à une

généralisation des systèmes de climatisation, un réchauffement du milieu marin favorisant la prolifération de germes halophiles comme les vibrions responsables du choléra, une augmentation de cas de leptospirose en cas de baignades plus fréquentes dans des zones à risque, un accroissement des infections fongiques graves chez les personnes immunodéprimées causé par les moisissures de l'habitat humide, etc…

La conjonction de différents facteurs, favorisant la dissémination d'une infection, peut être illustrée par l'épidémie récente de Chikungunya. Cette infection virale était connue depuis longtemps. Dans les îles de l'Océan Indien, l'environnement tropical et urbain a permis la pullulation du vecteur *Aedes albopictus* et augmenté les probabilités de contact homme-vecteur, à partir du moment où le virus a été introduit en 2005 par la circulation de personnes infectées, aux Comores puis à La Réunion. L'absence d'immunité parmi la population a joué un rôle favorisant dans la diffusion de l'épidémie qui a mis à rude épreuve la population, le système de soins et la société réunionnaise toute entière et qui a également révélé l'absence de connaissances approfondies sur cette arbovirose, son écologie et la lutte anti vectorielle s'y rattachant.

Comment se préparer ?

4.1. Anticiper

Les déterminants de l'émergence des phénomènes infectieux étant complexes et intriqués, la préparation se doit d'être multidisciplinaire. En raison de l'importance des zoonoses, la surveillance des réservoirs animaux doit intégrer l'analyse des conditions favorisant le franchissement de la barrière d'espèce (notamment les modifications virologiques, écologiques et comportementales) et les conditions permettant à l'agent pathogène d'origine animale de s'adapter à l'homme en créant une infection durable. La surveillance de l'épizootie aviaire et la préparation à la pandémie grippale illustrent cette anticipation multidisciplinaire, qui implique les services vétérinaires, les acteurs de la santé humaine, les virologues. Cette même démarche est appliquée dans les plans nationaux visant à anticiper et détecter l'introduction du Chikungunya ou du virus West Nile en métropole.

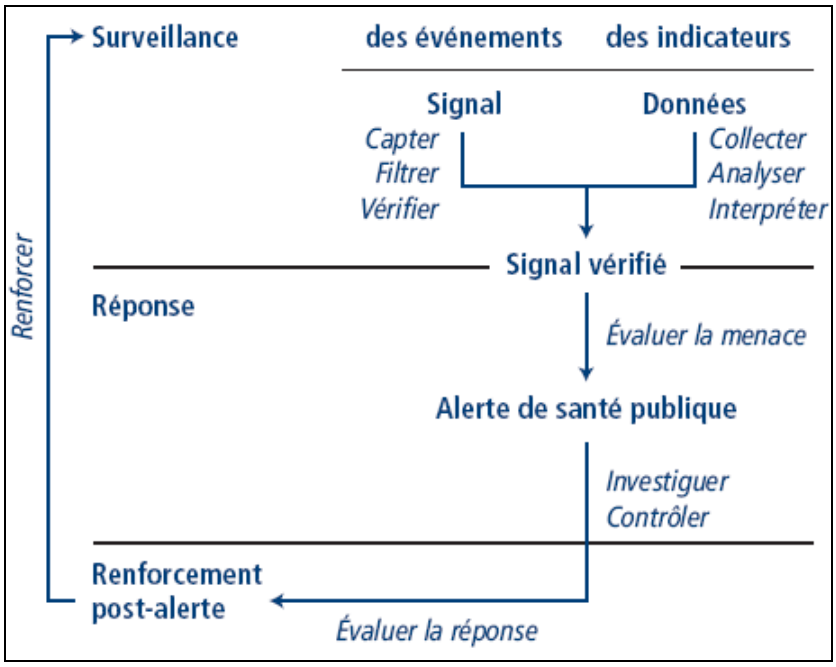
L'introduction d'un agent émergent dans la population peut être, ou non, suivie d'une dissémination secondaire [21]. Il peut exister une transmission interhumaine efficace qui permet la pérennisation de l'infection (VIH, SRAS par exemple) ; à l'inverse, d'autres infections ne sont pas suivies d'une transmission, lorsque l'agent est peu ou pas adapté à l'homme. Ces infections accidentellement transmises à l'homme par contact étroit animal-homme sont qualifiées d'impasses, dont un exemple actuel est l'influenza aviaire H5N1.

Les outils d'analyse spatio-temporelle intègrent la géographie et l'écologie des milieux pour identifier des zones à risque potentiel d'émergence. Les systèmes d'information géographique prennent une place grandissante dans la recherche et l'anticipation, de même que le recours à la climatologie et la démographie. Ces outils ont par exemple montré le rôle amplificateur des transports routiers de volailles dans la diffusion de l'épizootie aviaire dans certains pays asiatiques, rôle plus important que celui initialement supposé des axes de migration naturelle.

La veille internationale est un outil indispensable pour détecter et se préparer à l'introduction d'un phénomène qui surgit hors de nos frontières : infections nosocomiales à *Clostridium difficile* 027, SRAS. Mais il faut également prévoir les risques survenant au sein même du territoire. Ce constat, particulièrement marqué après l'épidémie de SRAS en 2003, a souligné le besoin de sensibiliser les acteurs de terrain au signalement de tout phénomène inhabituel pouvant représenter une menace pour la collectivité (Loi de

santé publique n° 2004-806). Pour cela il est demandé aux soignants, biologistes et acteurs de santé publique de "*signaler à l'InVS tout syndrome infectieux dont la fréquence et/ou les circonstances de survenue et/ou la présentation clinique et/ou la gravité sont jugées inhabituelles par le clinicien*", le signal pouvant être effectué par téléphone, fax ou email.

Schéma Principes de l'analyse et de la réponse aux signaux d'alerte issus de la surveillance, de la notification d'évènements inhabituels par les professionnels de santé et de la veille prospective

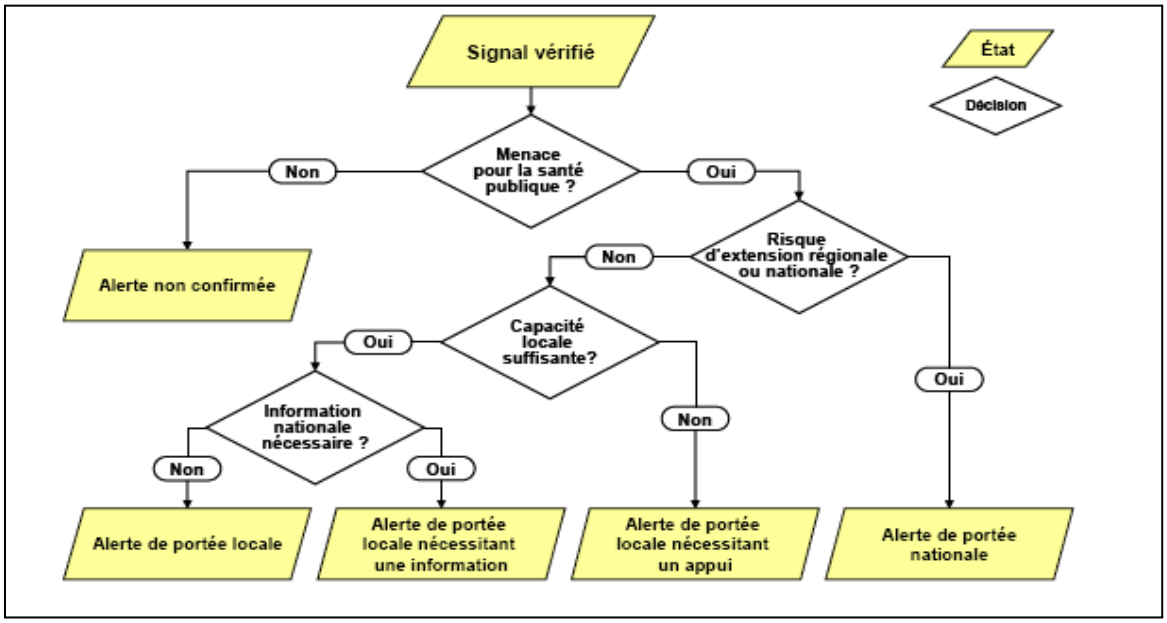


Source : InVS, Rapport annuel 2006

4.2. Analyser et évaluer le risque : une expertise multidisciplinaire

Le signal est suivi d'une analyse conjointe par les épidémiologistes, microbiologistes et cliniciens, afin d'évaluer si le risque est plausible et avéré. L'investigation est alors mise en place avec les différents partenaires de la surveillance et des alertes afin d'identifier la source, le mode de transmission, les facteurs de risque et l'évolutivité du phénomène, et de proposer à l'autorité sanitaire des mesures de prévention et de contrôle scientifiquement argumentées. En France, l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) organise et coordonne cette mission qui implique un nombre important de partenaires.

Evaluation de la portée des signaux



Source InVS (http://www.invs.sante.fr/publications/2005/prsp/rapport_prsp.pdf)

Il faut dans le même temps être capable de ***caractériser l'agent infectieux***. Les outils permettant d'isoler et identifier les agents non élucidés sont variés et complémentaires [22]. La mise en culture conditionne la rapidité d'identification et de caractérisation morphologique de même que les possibilités d'identification moléculaire. D'autres impératifs doivent être pris en compte : la qualité des prélèvements, la quantité de matériel cultivable, la possibilité d'éliminer les diagnostics différentiels à l'aide des analyses effectuées par des laboratoires de référence, l'accès à un laboratoire de sécurité P3 ou P4. Du fait de la diversité des outils biologiques, un travail en réseau faisant intervenir des équipes avec des approches et techniques complémentaires s'avère indispensable. Cette optimisation des moyens a été exemplaire pour le SRAS, la collaboration internationale de haut niveau ayant permis en quelques semaines d'identifier le coronavirus responsable de l'épidémie.

Souvent utilisées dans un second temps, ***les analyses de scénario et les modélisations*** réalisées dès le début d'une épidémie apportent des informations indispensables, en particulier l'estimation du taux de reproduction. Le Ro (nombre de reproduction de base) correspond au nombre de nouvelles infections générées par un sujet infecté dans une population d'individus susceptibles. Lorsqu'une fraction de la population acquiert une immunité, le taux de reproduction net R est représenté par R=Ro*proportion de sujets susceptibles, non immuns. L'infection est pérenne lorsque R > 1 et les stratégies de contrôle visent à abaisser ce taux. En permettant d'estimer l'ampleur de la diffusion d'un phénomène, les travaux de modélisation peuvent aider les gestionnaires à orienter les stratégies et évaluer leur efficacité.

Pour le Chikungunya à La Réunion, l'alerte a été lancée en avril 2005, dès la détection de cas dans l'île de Grande Comore. Cette alerte a facilité l'identification des premiers cas survenus à La Réunion et leur confirmation par le laboratoire national de référence. Un système de surveillance a été mis en œuvre immédiatement, puis adapté aux caractéristiques évolutives de l'épidémie. Il apparaît, rétrospectivement, qu'au moment de l'augmentation du nombre de cas au dernier trimestre 2005, une analyse

multidisciplinaire de scénario aurait permis de mieux prévoir l'évolutivité de l'épidémie et de retenir le scénario d'une épidémie de grande ampleur comme plausible, et en conséquence de proposer des stratégies de contrôle plus importantes, en renforçant les mesures de lutte anti-vectorielle [23;24].

Évaluation et recherche

Au-delà de la réponse à l'alerte, l'expertise se doit également de fournir des éléments pour l'évaluation afin d'adapter les stratégies mises en œuvre. L'évaluation peut être source de nouvelles questions ou d'hypothèses de recherche, dans des domaines aussi divers qu'une analyse de l'impact de la lutte anti-vectorielle ou une estimation du risque d'introduction d'une infection dans une zone géographique déterminée. De nombreux travaux de recherche ont par exemple été développés suite au SRAS pour modéliser le risque d'introduction et de diffusion secondaire d'une infection dans un territoire donné, en tenant compte notamment des stratégies de lutte mises en place par les autorités sanitaires (contrôle aux frontières, limitations des échanges internationaux…).

Conclusion

L'anticipation et le contrôle des risques infectieux émergents impliquent le renforcement et la coordination des capacités de veille, d'expertise, de recherche et de développement. La préparation repose en particulier sur une infrastructure de santé publique réactive, associée à une capacité de surveillance et d'investigation clinique, épidémiologique et microbiologique mobilisable à tout moment. L'interaction entre la surveillance et la recherche est fondamentale pour l'identification de listes d'agents infectieux qui pourraient émerger et l'analyse de la compréhension des mécanismes qui conduisent à des émergences, à travers des travaux de recherche planifiés combinés à des travaux réactifs lors d'émergence ou d'épidémies.

Par ailleurs la mise en œuvre des mesures de contrôle et de gestion ne peut se concevoir sans intégrer la dimension sociale autour des risques infectieux mal identifiés ou ré-émergents. Les sciences sociales permettent de mieux appréhender les déterminants sociodémographiques favorisant l'émergence et sa diffusion, de tenir compte des différences de perception du risque infectieux selon les individus ou groupes sociaux et de proposer, en temps de crise, des mesures de contrôle dont les enjeux sont compréhensibles par la population afin d'en garantir l'acceptabilité. Il importe ainsi d'analyser et de discuter les problèmes éthiques et déontologiques liés à l'isolement des patients, la quarantaine de leurs contacts et la gestion de la crise par les soignants afin d'améliorer la compréhension de ces mesures et leurs limites [25;26]. L'accès de plus en plus large aux medias et la transmission de plus en plus rapide des informations permettent une mise à jour continuelle des connaissances et aident les scientifiques à informer le public et les décideurs de manière plus réactive, permettant une meilleure préparation de la réponse. Néanmoins des perceptions différentes du degré de risque selon que l'on se place au niveau individuel, familial ou collectif ne peuvent être exclues. Lorsque le phénomène émerge dans des zones intertropicales, la perception du risque peut être sous-estimée en raison de l'éloignement géographique, le risque étant alors perçu comme spécifique à certains groupes de population comme les touristes ou les immigrants [27;28].

Enfin, le niveau socio-économique du pays touché et la capacité de son système de santé à faire face à une émergence infectieuse restent des déterminants majeurs de la diffusion et du contrôle de l'infection. Le hiatus entre l'ampleur de l'épizootie aviaire et la capacité de réponse des pays est illustré avec une acuité particulière en Indonésie ou dans les pays africains. De ce fait, la mondialisation, qui contribue à la diffusion et l'amplification

rapides d'une infection survenant en un point quelconque du globe à travers les échanges internationaux, appelle une même mondialisation de la réponse.

Reference List

[1] Desenclos JC, De Valk H. [Emergent infectious diseases: importance for public health, epidemiology, promoting factors, and prevention]. Med Mal Infect 2005 Feb;35(2):49-61.

[2] McMichael AJ. Environmental and social influences on emerging infectious diseases: past, present and future. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2004 Jul 29;359(1447):1049-58.

[3] Emerging infectious diseases: memorandum from a WHO meeting. Bull World Health Organ 1994;72(6):845-50.

[4] Ministère de la santé (Department of Health) Expert Panel on SARS and Infectious Disease Control (Walker) report--executive summary. Healthc Q 2004;7(3):37-9.

[5] Pepin M, Boireau P, Boue F, Castric J, Cliquet F. Emergence des maladies infectieuses animales et humaines. INRA Prod Anim.2007; 20 (3), 199-206.

[6] Herida M, de Berbeyrac B, Sednaoui P, Scieux C, Lemarchand N, Kreplak G, et al. Rectal lymphogranuloma venereum surveillance in France 2004-2005. Euro Surveill 2006 Sep;11(9):155-6.

[7] Deuffic S, Buffat L, Poynard T, Valleron AJ. Modeling the hepatitis C virus epidemic in France. Hepatology 1999 May;29(5):1596-601.

[8] Aguilera JF, Perrocheau A, Meffre C, Hahne S. Outbreak of serogroup W135 meningococcal disease after the Hajj pilgrimage, Europe, 2000. Emerg Infect Dis 2002 Aug;8(8):761-7.

[9] InVS, CClin, Cire, DDASS. Infections à Clostridium difficile de type 027, France. Bilan au 4 avril 2007. Institut de Veille Sanitaire 2008

[10] Kuijper EJ, Coignard B, Tull P. Emergence of Clostridium difficile-associated disease in North America and Europe. Clin Microbiol Infect 2006 Oct;12 Suppl 6:2-18.:2-18.

[11] Woolhouse ME, Gowtage-Sequeria S. Host range and emerging and reemerging pathogens. Emerg Infect Dis 2005 Dec 12;11(12):1842-7.

[12] Holmes KV. Structural biology. Adaptation of SARS coronavirus to humans. Science 2005 Sep 16;309(5742):1822-3.

[13] Butt KM, Smith GJ, Chen H, Zhang LJ, Leung YH, Xu KM, et al. Human infection with an avian H9N2 influenza A virus in Hong Kong in 2003. J Clin Microbiol 2005 Nov;43(11):5760-7.

[14] Matrosovich MN, Krauss S, Webster RG. H9N2 influenza A viruses from poultry in Asia have human virus-like receptor specificity. Virology 2001 Mar 15;281(2):156-62.

[15] Gubler DJ, Reiter P, Ebi KL, Yap W, Nasci R, Patz JA. Climate variability and change in the United States: potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. Environ Health Perspect 2001 May;109 Suppl 2:223-33.

[16] Armstrong GL, Hollingsworth J, Morris JG, Jr. Emerging foodborne pathogens: Escherichia coli O157:H7 as a model of entry of a new pathogen into the food supply of the developed world. Epidemiol Rev 1996;18(1):29-51.

[17] Investigation of progressive inflammatory neuropathy among swine slaughterhouse workers--Minnesota, 2007-2008. MMWR Morb Mortal Wkly Rep 2008 Feb 8;57(5):122-4.

[18] Bernard SM, Anderson SA. Qualitative assessment of risk for monkeypox associated with domestic trade in certain animal species, United States. Emerg Infect Dis 2006 Dec;12(12):1827-33.

[19] Patz JA. Global warming. BMJ 2004 May 29;328(7451):1269-70.

[20] Groupe interministériel. Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France. Ministère de la Santé, Avril 2008; www.sante-jeunesse-sports.gouv.fr/IMG//pdf/rapport_changt_climatique_et_sante_France.pdf

[21] Antia R, Regoes RR, Koella JC, Bergstrom CT. The role of evolution in the emergence of infectious diseases. Nature 2003 Dec 11;426(6967):658-61.

[22] X.de Lamballerie. Colloque Multidisciplinaire 2007 : Anticipation, détection et réponse aux risques infectieux émergents en France. www.invs.sante.fr/publications/2007/colloque_emergences/x_lamballerie_n6.pdf

[23] Boelle PY, Thomas G, Vergu E, Renault P, Valleron AJ, Flahault A. Investigating transmission in a two-wave epidemic of Chikungunya fever, Reunion Island. Vector Borne Zoonotic Dis 2008 Apr;8(2):207-17.

[24] Institut de Veille Sanitaire. Chikungunya en 2006 : la crise et ses enseignements. InVS, Rapport Annuel 2006 2008

[25] Bernstein M, Hawryluck L. Challenging beliefs and ethical concepts: the collateral damage of SARS. Crit Care 2003 Aug;7(4):269-71.

[26] Selgelid MJ. Ethics and infectious disease. Bioethics 2005 Jun;19(3):272-89.

[27] de Zwart O, Veldhuijzen IK, Elam G, Aro AR, Abraham T, Bishop GD, et al. Avian influenza risk perception, Europe and Asia. Emerg Infect Dis 2007 Feb;13(2):290-3.

[28] Flahault A, Aumont G, Boisson V, de L, X, Favier F, Fontenille D, et al. [Chikungunya, La Reunion and Mayotte, 2005-2006: an epidemic without a story?]. Sante Publique 2007 May;19 Suppl 3:S165-S195.

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes

A quoi devons-nous nous préparer?

Evolutions environnementales et santé
Symposium INMA - Tours, 19 Septembre 2008

Dr Dounia BITAR
Département des maladies infectieuses
INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE

"Maladies infectieuses émergentes" Points de repère et définitions

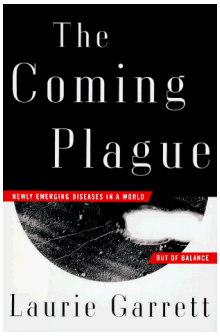
Années 1970 :

" *… vers un déclin des maladies infectieuses* "

(Progrès médicaux, antibiotiques, vaccins, amélioration des conditions de vie, …)

Peste à Marseille, 1720-1722
(30 à 40 000 morts /90 000 habitants)

1994



OMS, 1996 :

1976: *Cryptosporidium parvum*, a parasite which causes acute and chronic diarrhoea.
1977: *Legionella pneumophila*, the bacterium which causes potentially fatal Legionnaires' disease.
1977: Ebola virus, which causes haemorrhagic fever – fatal in up to 80% of cases.
1977: Hantaan virus, which causes potentially fatal haemorrhagic fever with renal syndrome.
1977: *Campylobacter jejuni*, a bacterium which causes diarrhoea.
1980: Human T-lymphotropic virus I (HTLV-1), which causes lymphoma-leukaemia.
1982: *Escherichia coli* O157:H7 strain of bacteria, which causes bloody diarrhoea.
1982: HTLV-2 virus, which causes hairy cell leukaemia.
1983: *Helicobacter pylori*, the bacterium associated with peptic ulcer disease and stomach cancer.
1983: Human immunodeficiency virus (HIV), which causes AIDS.
1988: Hepatitis E virus, which causes epidemics of jaundice in hot climates.
1988: Human herpesvirus 6, which causes fever and rash.
1989: Hepatitis C virus, which causes liver cancer as well as liver disease.
1991: Guanarito virus, which causes Venezuelan haemorrhagic fever.
1992: *Vibrio cholerae* O139, which causes epidemic cholera.
1994: Sabia virus, which causes Brazilian haemorrhagic fever.
1995: Human herpesvirus 8, associated with Kaposi's sarcoma in AIDS patients.

Source OMS- Rapport annuel 1996

Maladies infectieuses émergentes Définitions

OMS, 1997 :

Des infections nouvelles, ou la résurgence ou l'augmentation d'infections connues.

Royaume Uni, 2005 :

Une entité clinique d'origine infectieuse nouvellement identifiée, ou une augmentation d'incidence dans un endroit donné ou dans un groupe de population donné.

France, 2006 :

Un phénomène infectieux (ou présumé infectieux) inattendu, touchant l'homme, l'animal ou les deux.

Il peut s'agir

- D'une nouvelle entité clinique ;
- D'une augmentation de l'incidence dans un espace ou un groupe de population donné ;
- D'une modification qualitative ou quantitative des caractéristiques de l'agent, de la population touchée ou de l'environnement.

Groupe multidisciplinaire INSERM, INRA, IRD, AFSSA, InVS, Institut Pasteur
Coordination Ministère de la Recherche

Modalités de l'émergence infectieuse *chez l'homme*

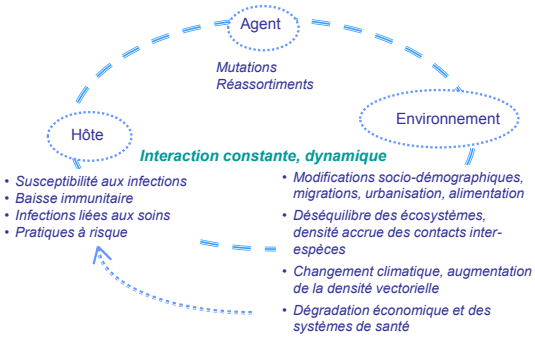
Introduction d'un (nouveau) pathogène

Dissémination

Pérennisation
Adaptation du germe à l'hôte
Population réceptive (naïve)
Circulation du germe et diffusion

Impasse biologique

L'agent biologique n'est pas tout



L'hôte

1. Lymphogranulomatose vénérienne, Europe 2002 - 2005

- Pays-Bas : 136 cas
- France : 142 LGV rectale entre 2002 et 2005
  Hommes, âge moyen 38 ans
  Proportion importante de sujets VIH+
- Allemagne, Royaume-Uni, Espagne: cas identifiés dès 2004

Confirmation de la diffusion de l'infection dans la communauté homosexuelle d'Europe occidentale, liée à :

- **Une augmentation des pratiques à risque**
- **Un recul des mesures de prévention cette population**

Herida et al, Eurosurveillance Sept 2006

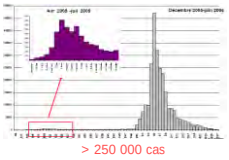
L'agent infectieux

- Des germes auparavant inconnus, apparus de novo
  Légionelles, VIH, prion, virus Nipah & Hendra, coronavirus SRAS…
- Des souches nouvelles, résistantes ou adaptées à l'homme
  Clostridium difficile 0127, Méningocoque W135, Grippe HxNy, Entérocoques Vanco_résistants et utilisation massive de glycopeptides…
- Des germes connus mais survenant dans des territoires inhabituels
  Hantavirus (USA), Chikungunya (La Réunion), West Nile, …

Exemple du Chikungunya

- Un germe connu de longue date
- Début de l'épidémie au Kenya (2004) ; Comores (2005); La Réunion, Madagascar (2005) ; Asie Sud-Est (2006)
- Vecteur : *Aedes (aegypti* puis *albopictus)* dont le développement urbain est en expansion

Chikungunya à La Réunion : une épidémie massive



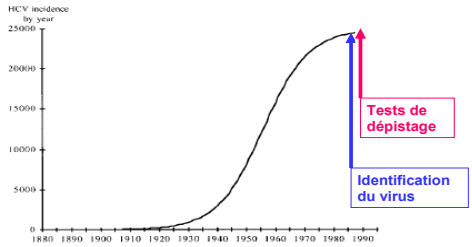
- Introduction du germe dans des zones indemnes via les déplacements des sujets infectieux
- Dans une zone où la population était "naïve" (non immune)
- Epidémie liée à la densité du vecteur, la densité des contacts avec l'homme, et à la susceptibilité de la population

1989 : Identification du virus Hépatite C

L'émergence n'est pas toujours bruyante

Infection → Symptômes → Diagnostic

Hépatite chronique, Cirrhose



Deuffic et al., Hepatology 1999.

Environnement et émergences infectieuses

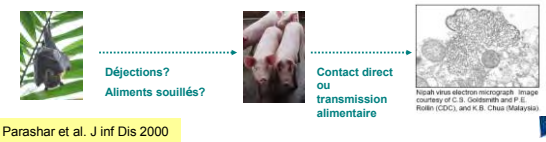
- Un champ très vaste, complexe
- Importance des zoonoses : 75% des agents émergents répertoriés chez l'homme sont d'origine animale

Woolhouse, EID 2005

Déséquilibre des écosystèmes Modification des contacts inter-espèces

Ex. Virus Nipah, Malaisie 1998

- > 250 infections (encéphalites) et >100 décès chez des éleveurs de porcs et travailleurs en abattoirs
- Transmission chauve souris – porcs – humains facilitée par la déforestation et l'implantation d'élevages de porcs dans des zones d'habitat des chauve souris.



Parashar et al. J inf Dis 2000

Emerg Infect Dis, Juillet 2008

Unique Pattern of Enzootic Primate Viruses in Gibraltar Macaques

50% macaques porteurs du simian foamy virus (rétrovirus)

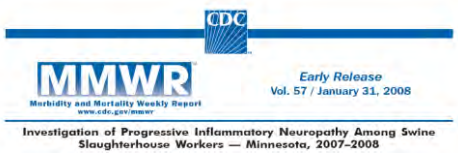
Transmission possible à l'homme

170 blessures/an chez les touristes

➢ Réguler le contact animal-homme sur le rocher

Environnement, Processus de production alimentaire

12 cas de neuropathies inflammatoires périphériques (NIP) incluant des paralysies ou déficits moteurs, parmi des travailleurs en abattoirs de porcs



NIP, Etats-Unis 2007-2008

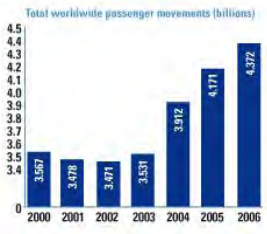
- Injection d'air comprimé dans la boîte cranienne pour extirper la cervelle (liquéfiée) => projection de gouttelettes pouvant contenir du matériel neurologique.
- Protection disponible (gants, lunettes, blouses, bottes) mais utilisation ?
- Dès le début de l'investigation : Technique suspendue + protections individuelles supplémentaires
- En France = Vérifier si une pratique similaire est utilisée dans certains abattoirs + Rappel des précautions
- Etiologie reste à déteminer (Phénomène infectieux? immunologique?)

Mondialisation : Amplification de la diffusion

Intensification des voyages et échanges internationaux

Risque d'importation de nouvelles pathologies dans une population "naïve"

Potentiel de diffusion rapide



Airports Council International

Highly Pathogenic H5N1 Influenza Virus in Smuggled Thai Eagles, Belgium

Steven Van Borm,* Isabelle Thomas,† Germaine Hanquet,† Bénédicte Lambrecht,* Marc Boschmans,* Gérald Dupont,† Mireille Decaestecker,* René Snacken,† and Thierry van den Berg*

We report the isolation and characterization of a highly pathogenic avian influenza A/H5N1 virus from Crested Hawk-Eagles smuggled into Europe by air travel. A screening performed in human and avian contacts indicated no dissemination occurred. Illegal movements of birds are a major threat for the introduction of highly pathogenic avian influenza.

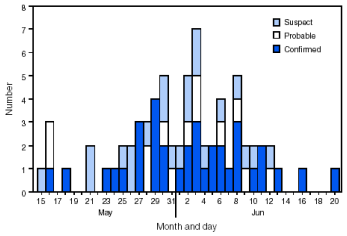
Emerging Infectious Diseases

Mondialisation et "NAC" Exemple du monkey pox

- Pox virus (~variole)
- Réservoir animal
- Afrique centrale-occidentale
- Transmission à l'homme
- Incubation ~12 jours
- Eruption cutanée similaire à la variole, après contact avec animal malade
- Létalité : 1 à 10%
- Epidémies régulièrement rapportées en Afrique centrale

Monkey pox aux Etats-Unis, 2003
71 cas, 0 décès (six états)

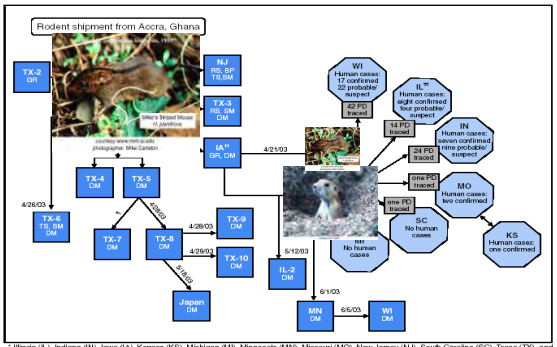
FIGURE 1. Number of monkeypox cases*, by date of illness onset — Illinois, Indiana, Kansas, Missouri, Ohio, and Wisconsin, 2003†



MMWR Weekly 2003 / 52(27)

* N = 69 of 71 cases with known date of illness onset.
† As of July 8, 2003.

FIGURE 2. Movement of imported African rodents to animal distributors and distribution of prairie dogs from an animal distributor associated with human cases of monkeypox — 11 states*, 2003†§



* Illinois (IL), Indiana (IN), Iowa (IA), Kansas (KS), Michigan (MI), Minnesota (MN), Missouri (MO), New Jersey (NJ), South Carolina (SC), Texas (TX), and Wisconsin (WI). Japan is included among sites having received shipment of rodents implicated in this outbreak.
† As of July 8, 2003.
§ Date of shipment unknown.
** Identified as distributor C in *MMWR* 2003;52:561–4.
†† Identified as distributor D in *MMWR* 2003;52:561–4.

Changement climatique Impact potentiel sur la santé humaine

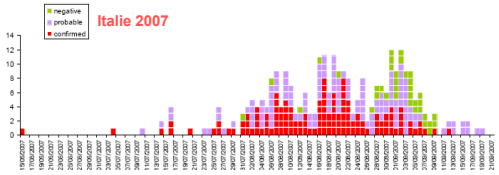
MEDAD / Ministère de la santé, 2008 : Recensement des impacts sanitaires potentiels du changement climatique en France

- Réchauffement air/eau = vibrions, champignons pathogènes (moisissures & habitat)
- Modes de vie = légionellose, salmonelloses et autres bactéries alimentaires, leptospirose
- Maladies vectorielles (West Nile, Dengue, Paludisme..)
- Etc..

www.sante-jeunesse-sports.gouv.fr/IMG//pdf/rapport_changt_climatique_et_sante_France.pdf

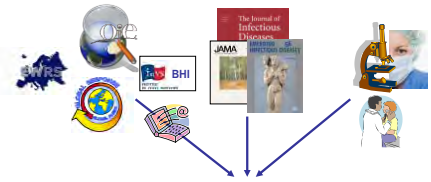
A quoi devons-nous nous préparer?

- **Risque attendu/prévisible**
  - La planification est possible
    Plans nationaux : Pandémie Grippe, Chikungunya, West Nile, …
  - Des mesures sont envisageables
    Bon usage des antibiotiques (homme/animal), lutte antivectorielle,…
- **Que faire des risques inattendus?**
  Hiver 2002-2003 : SRAS vs. H5N1



Anticiper

- Examiner les conditions d'introduction / diffusion d'un phénomène infectieux émergent
- Si le risque est jugé plausible, organiser la réponse pour limiter la dissémination



Phénomène émergent ?
(infectieux)

Analyse de risque

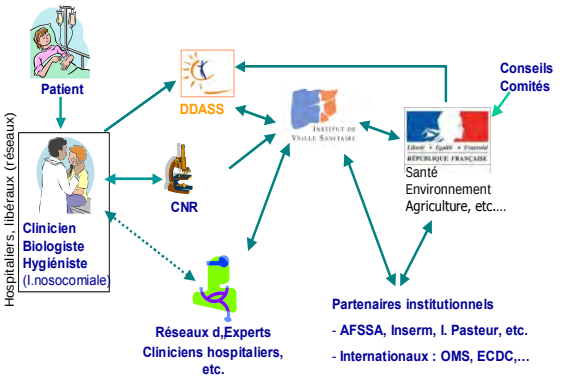
Détecter un phénomène inhabituel survenant en France ?

- **Les systèmes existants**
  (exemple : Maladies à déclaration obligatoire)
  - Sont basés sur des entités cliniques définies
  - Peu conçus pour identifier des phénomènes nouveaux
  - Mais permettent de repérer des augmentations anormales

Détecter un phénomène inhabituel survenant en France ?

- ***"…doit être signalé.." :***

  " tout syndrome infectieux dont la fréquence et/ou les circonstances de survenue (l'origine) et/ou la présentation clinique et/ou la gravité sont jugées inhabituelles "



Conclusion

- Analyse multidisciplinaire
- Critères non figés
- Concept dynamique, évolutif

Remerciements

Isabelle Capek, Didier Che, Jean-Claude Desenclos, Francesco Grandesso, Mathilde Pascal

(Départements Maladies infectieuses et Santé-environnement, InVS)

Ebola, Afrique occidentale

Introduction d'un nouveau pathogène

Contact animal-homme : forestiers, chasseurs

Dissémination

Infection → Symptômes
Retour des forestiers dans leur village

Pérennisation

- Sujet symptomatique
- Transmission interhumaine (fluides corporels)
- Epidémies (plusieurs villages)
- Isolement strict permet l'arrêt de la chaîne de transmission

Impasse biologique

Grippe aviaire A H5N1

Introduction d'un nouveau pathogène

Contact animal-homme : éleveurs, contact volailles

Infection => symptômes

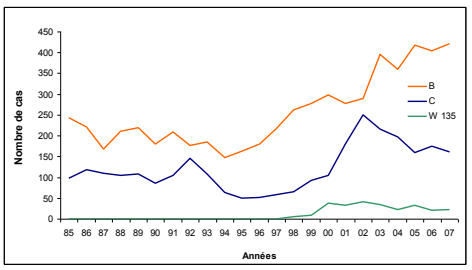
Pérennisation

Impasse biologique

- Pas (peu) de transmission interhumaine
- Risque potentiel d'adaptation à l'homme lié à la rencontre entre le virus humain classique et la souche aviaire (mutations, réassortiments)

Méningocoque W135

Infections invasives à méningocoque de sérogroupes B, C et W135
France, 1985-2007



Source InVS- I.Parent

2. Epidémie d'infections à Klebsiella pneumoniae multirésistantes en Europe

CHU d'Ile-de-France

- Centre de chirurgie digestive (81 lits): 100 transplantations/année
- Recrutement international

Cas index : Décembre 2003

- Patient transféré de Grèce
- *K. pneumoniae* résistant (testé le jour de l'admission)

7 cas secondaires de décembre à mai

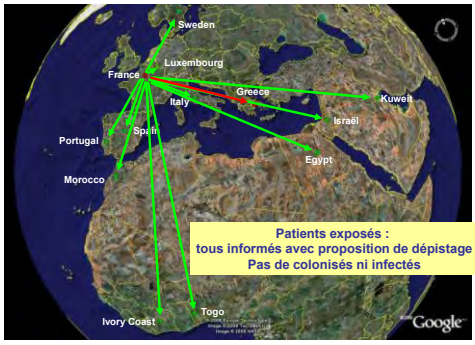
- 5 infections, 2 colonisations
- 4 cas en réamination, 3 cas en chirurgie

325 patients "exposés"

dont 47 patients étrangers originaires de 12 pays

Kassis-Chikhani N et al. First outbreak of multidrug-resistant *K. pneumoniae* carrying blaVIM-1 and blaSHV-5 in a French university hospital. *J Antimicrob Chemother* 2006;57:142-5.

Epidémie d''nfection à *K. pneumoniae* multi-résistant Potentiel de dissémination internationale ?



Patients exposés :
tous informés avec proposition de dépistage
Pas de colonisés ni infectés

Agents biologiques et maladies infectieuses émergentes : Actualités du monde animal

Pr Marc ARTOIS

UR Environnement et prévision de la santé des populations,
TIMC IMAG Grenoble et
Ecole nationale vétérinaire de Lyon

m.artois@vet-lyon.fr

Au cours des dernières années, de nombreuses publications ont décrit et commenté le phénomène de **maladies émergentes.** Nous nous intéressons ici au point de vue de la santé publique vétérinaire, concept récent défini selon l'Académie Vétérinaire de France comme « *l'ensemble des actions qui sont en rapport direct ou indirect avec les animaux, leurs produits et sous-produits, dès lors qu'elles contribuent à la protection, à la conservation et à l'amélioration de la santé de l'Homme, c'est à dire son bien-être, physique, moral et social ».*

La santé publique vétérinaire couvre les champs d'intervention relatifs à la santé et à la protection des animaux, la sécurité sanitaire des aliments et la préservation de l'environnement[51]. Un des champs fondamentaux de cette discipline est la protection de la santé de l'homme par la prévention et la lutte contre les zoonoses. On prête à Virchow[52] l'invention de ce terme (travaux sur la trichinellose) et la création du concept d'une seule médecine de l'homme et de l'animal (Brown 2003). Pour l'Organisation Mondiale de la Santé Animale (OIE), zoonose désigne toute *maladie* ou *infection* naturellement transmissible des animaux (vertébrés) à l'homme[53].

Les vétérinaires se préoccupent également de maladies émergentes, (Brown *et al.* 1994; Toma and Thiry 2003). L'OIE les désigne comme « une nouvelle *infection* résultant de l'évolution ou de la modification d'un agent pathogène existant, une *infection* connue se propageant à une nouvelle aire géographique ou à une nouvelle *population*, la présence d'un agent pathogène non identifié précédemment ou encore une *maladie* diagnostiquée pour la première fois et ayant des répercussions significatives sur la santé animale ou la santé publique. ».

Parmi les agents pathogènes infectieux, impliqués dans l'émergence de maladies humaines, les agents zoonotiques occupent une place prépondérante (Cleaveland *et al.* 2001; Taylor *et al.* 2001). L'épisode du Syndrome Respiratoire Aigu Sévère, en 2002 et 2003 (Berger *et al.* 2004) illustre parfaitement le processus initial qui permet l'apparition puis la dissémination d'une maladie émergente à réservoir animal.

L'exposé décrit et analyse les étapes qui conduisent de la capture d'un nouvel hôte (homme ou animal domestique, Combes 1995) par un agent pathogène, à sa dissémination, à son épidémisation puis son endémisation, à ce stade le processus cesse d'être zoonotique. Cette présentation nous amènera à définir précisément ce qu'est un réservoir de maladie infectieuse (avec l'exemple du Chien, Haydon *et al.* 2002). Enfin pour conclure, nous verrons qu'une réévaluation récente de la littérature (Jones *et al.* 2008) attribue à la faune sauvage un rôle prépondérant comme source de maladies émergentes y compris en Europe. La profession vétérinaire, du praticien aux inspecteurs de la santé publique vétérinaire, en passant par les enseignants des quatre Ecoles vétérinaires françaises, est directement impliquée dans l'étude et la surveillance de ces phénomènes, avec l'appui des ministères concernés et de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) qui coordonne un des plus anciens réseau de surveillance sanitaire de la faune sauvage dans le monde : le réseau SAGIR (Terrier *et al.* 2006). Le récent épisode d'Influenza aviaire hautement pathogène H5N1 aura été l'occasion de mettre à l'épreuve ce réseau et de montrer son utilité (Artois *et al.* 2007).

[51] . http://vet-lyon.fr/ensv/SantePublVeto.htm
[52] Rudolf Virchow, 1821-1902, médecin et homme politique autrichien reconnu créateur de l'anatomopathologie.
[53] http://www.oie.int/fr/normes/mcode/fr_chapitre_1.1.1.htm.

Références citées

Artois, M., D. Bicout, J. Coppalle, D. Doctrinal, I. Durand, J. Hars et P. Sabatier (2007). "Maladies émergentes de la faune sauvage en Europe: Leçons à retenir pour se prémunir d'un retour de l'influenza aviaire." Bulletin de l'Académie vétérinaire de France (3): 215-222.

Berger, A., C. Drosten, H. W. Doerr, M. Sturmer and W. Preiser (2004). "Severe acute respiratory syndrome (SARS)--paradigm of an emerging viral infection*1." Journal of Clinical Virology (1): 13-22.

Brown, C. (2003). "Virchow revisited: emerging zoonoses." ASM News (10): 493-497.

Cleaveland, S., M. K. Laurenson and L. H. Taylor (2001). "Diseases of humans and their domestic mammals: Pathogen characteristics, host range and the risk of emergence." Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences (1411): 991.

Combes, C. (1995). Interactions durables : écologie et évolution du parasitisme. Paris Masson.

Haydon, D. T., S. Cleaveland, L. H. Taylor and M. K. Laurenson (2002). "Identifying Reservoirs of Infection: A Conceptual and Practical Challenge." Emerging Infectious Diseases (12): 1468-1473.

Jones, K. E., N. G. Patel, M. A. Levy, A. Storeygard, D. Balk, J. L. Gittleman and P. Daszak (2008). "Global trends in emerging infectious diseases." Nature (7181): 990-993.

Taylor, L. H., S. M. Latham and M. E. J. Woolhouse (2001). "Risk factors for human disease emergence." Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences: 983-989.

Terrier, M. E., E. Picard, J. Barrat, A. Guibe et F. Cliquet (2006). Surveillance sanitaire de la faune sauvage en France: Réseau Sagir et épidémio-surveillance de la rage des chiroptères, Académie vétérinaire de France. 383-387.

Toma, B. et E. Thiry (2003). "Qu'est ce qu'une maladie émergente ?" Epidémiologie et santé animale : 1-11.

Agents biologiques et maladies infectieuses émergents.

Virschov

Actualités du monde animal

Agents et maladies émergents : des faits aux théories…

- Les maladies infectieuses de l'homme: zoonoses et émergence, un exemple
- La théorie
  - A) l'origine
  - B) la propagation
- L'avenir est il lisible dans le passé ?
  - Prévisions/ prédictions…

Maladies émergentes : critères

Pour l'Europe

- Nouveauté :
  - Augmentation réelle d'incidence
  - Propagation & Pérennisation
- Implication en SPV (transmission)
  - Zoonoses (homme)
  - Économie (bétail, volaille, gibier)

TOMA & THIRY 2003
C. BROWN 2003, 1997

Risque d'émergence

	Catégorie	*Risque relatif*
Statut zoonosique	Non	0,52
	Oui	1,93
Classement taxinomique	Virus	4,33
	Bactérie	0,71
	Mycose	0,33
	Protozoaire	2,49
	Helminthe	0,24
Voie de transmission	Contact direct	1,47
	Contact indirect	0,80
	Vectoriel	2,35

(proportion d'espèces émergentes de la catégorie/proportion d'émergentes hors catégorie)

Taylor et al. 2001

Ex. le SRAS

- 16 novembre 2002: Foshan, (Guangzhou)
- 17 décembre : Heyuan → famille, personnel hospitalier
- → Guangzhou hôpital → hospitalier, famille (février)
- → Dr L.J. → HongKong, hôtel Métropole
- → Toronto

Facteurs de risque

- Marchés animaux
- Restaurants
- Pas fermes

→ animaux sauvages

→ Marché de Shenzen

Pourquoi la Civette ?

- *Paguma larvata*
  - prévention contre «rhume »
  - Récente augmentation de consommation
    - Pas mentionnée à Hong Kong en 1967, « milliers » en 1989
  - Fermes élevage

Civette = victime et relai (véhicule) mais pas source

Karesh 2005, 2007

Hypothèse d'un réservoir sauvage

- Source = le Rhinolophe (ch… …un
  - Civette (véhicule) → Homme

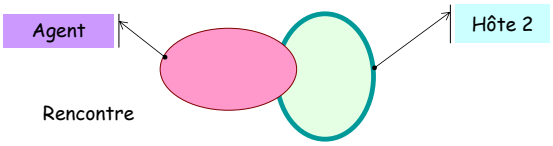
W. Li et al. 2005

Agents et maladies émergents : des faits aux théories…
2ème Partie

- Les maladies infectieuses de l'homme: zoonoses et émergence, un exemple
- La théorie
  - A) l'origine
  - B) la propagation
- L'avenir est il lisible dans le passé ?
  - Prévisions/ prédictions…

« Capture » d'un hôte par un « parasite »

étape n°1 (sporadique)



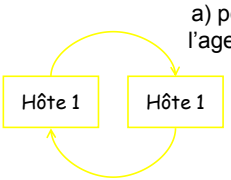
Compatibilité (réceptivité)

Sensibilité

Combes 1995

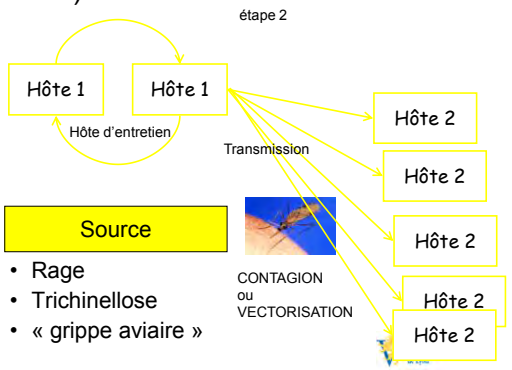
Deux conditions :

a) persistance de l'agent pathogène



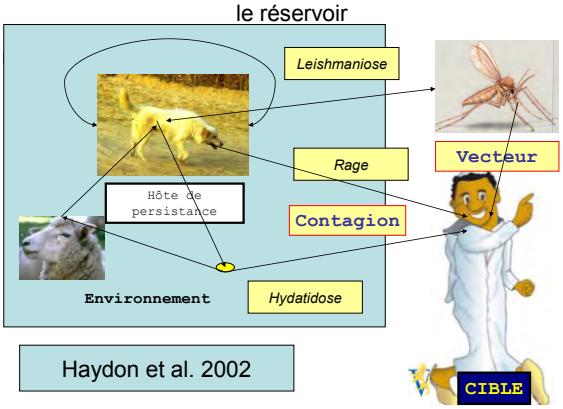
- Transmissibilité (R0)
  - Conditions pour pérenniser la circulation de l'agent pathogène
    - Virulence
    - Efficacité de la transmission

b) Transmission « accidentelle »



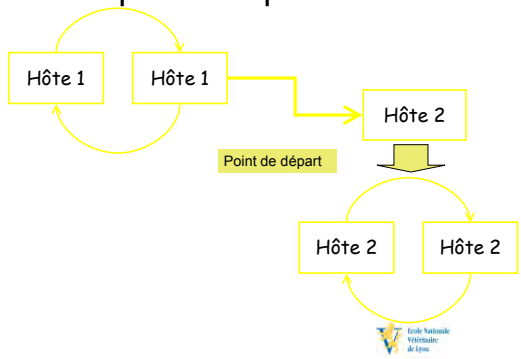
- Rage
- Trichinellose
- « grippe aviaire »

Si deux conditions réunies :
le réservoir



Haydon et al. 2002

Étape 3 : L'épidémisation

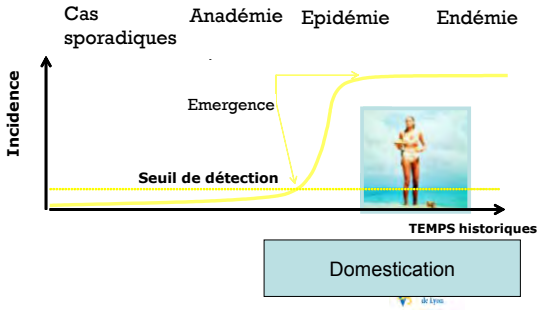


Agents et maladies émergents : des faits aux théories…
2ème Partie (synthèse)

- Les maladies infectieuses de l'homme: zoonoses et émergence, un exemple
- La théorie
  - A) l'origine
  - B) la propagation

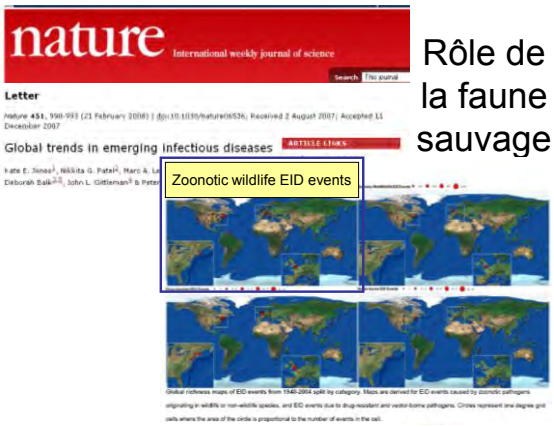
  Comment interviennent l'animal et ses parasites dans le processus ?
- L'avenir est il lisible dans le passé ?
  - Prévisions/ prédictions…

Animal ➔homme = Source



Domestication

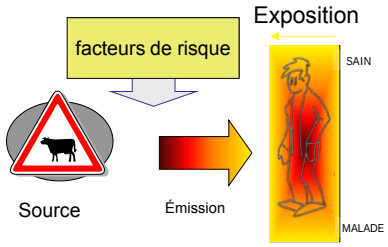
Rôle de la faune sauvage



Agents et maladies émergents : des faits aux théories…
3ème Partie

- Les maladies infectieuses de l'homme: zoonoses et émergence, un exemple
- La théorie
  - A) l'origine
  - B) la propagation
- L'avenir est il lisible dans le passé ?
  - Prévisions/ prédictions…

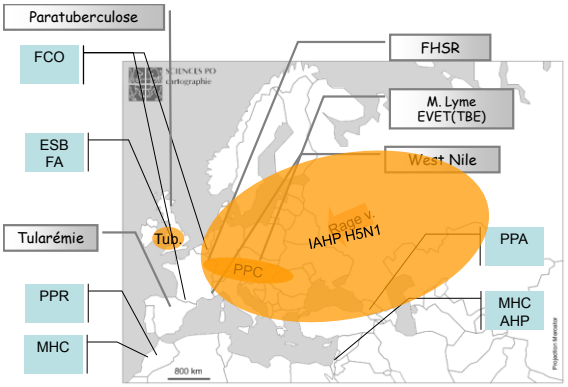
La boule de cristal = Théorie



Facteurs de risque : démographie humaine/ dérèglement climatique

Émission (animal) — Exposition (homme)

	Étape 1 sporadique	Étape 2 anadémique	Étape 3 épidémique
Agents			
Contagion directe	Transplantations Mode de vie	Espèces anthropophiles	Globalisation
Contagion indirecte	Temp. Hygrom° Ensol.	Persistance résistance	Globalisation
Vectorisation	voyageurs	Migrations acclimatation	délocalisation



Mies infectieuses émergentes animales

- Remerciements

- Revue scientifique et technique de l'OIE (organisation mondiale de la santé animale)
  - Maladies faune sauvage
  - Zoonoses émergentes
  - Réchauffement climatique

Prof. Marc ARTOIS
m.artois@vet-lyon.fr

Environnement professionnel et santé. Des effets immédiats aux impacts à long terme, quels facteurs de risque savons-nous identifier ?

Pr Alain BERGERET

Université Claude Bernard, Lyon 1, EMR T 9405

La mise en évidence des effets délétères de l'environnement professionnel sur la santé des individus au travail s'est développée parallèlement à la médecine moderne sur des bases cliniques, d'observation d'effets immédiats (ou presque), inattendus et souvent spécifiques chez des individus exposés fortement et de façon évidente à un toxique. Le caractère spécifique des symptômes, l'immédiateté de leur survenue et l'évidence de l'exposition permettait d'affirmer le lien, fort, entre maladie et nuisance. La description clinique des symptômes, réunis en syndromes, puis la mise en évidence d'une étiologie ont permis de caractériser des maladies précises. Si ce cas de figure de maladie mono-factorielle est encore retrouvé quelquefois, le contexte a complètement changé et la situation est habituellement bien différente, qu'il s'agisse de l'identification de facteurs de risque ou de diagnostic de maladie pouvant être en relation de causalité avec le travail.

Les impacts à long terme des décisions humaines sur l'environnement commencent à peine à être étudiés. La mise en service de nouvelles molécules, nouveaux matériaux et de nouveaux procédés au travail a longtemps été faite sans analyser leurs impacts. L'impact de l'environnement professionnel sur la santé devrait idéalement être connu avant que le xénobiotique ou l'organisation du travail apparaisse. Cette démarche de prévention primaire est le fondement de REACH. Compliquée avec les xénobiotiques, cette démarche l'est encore plus avec les organisations qui influent aussi sur les expositions.

Les effets délétères sur la santé à plus ou moins long terme sont les cancers, les troubles de la reproduction et quelques maladies chroniques non cancérogènes comme la maladie de Parkinson, particulièrement d'actualité dans le monde agricole. Les maladies sont pluri-factorielles avec quelques étiologies connues, d'origine toxique ou non, les expositions s'étalent sur des dizaines d'années, sont nombreuses, intermittentes, diluées.

Pouvoir continuer à identifier des facteurs de risque professionnels ou environnementaux nécessite que les outils soient adaptés à ces situations. Il faut aussi noter les attentes de la Société, qui n'est plus prête à accepter avec fatalisme que des effets délétères, soient mises au jour après des dizaines d'années d'exposition des populations.

Pour pouvoir déterminer si l'environnement professionnel a un impact sur la santé, il convient que les deux termes du couple maladie-nuisance soient bien définis et bien évalués.

Des maladies

La définition d'une maladie est le plus souvent claire. Nous disposons d'outils de diagnostic, souvent de critères cliniques et para cliniques de diagnostic, établis par consensus et par les sociétés savantes et validés. Nous disposons également de nomenclatures internationales classant les maladies. Il ne faut toutefois pas méconnaître les difficultés de diagnostic dans certains cas et les évolutions dans le temps. Les progrès des connaissances permettent sans cesse de mieux définir des maladies ayant eu des diagnostics moins précis dans le passé. Il en est ainsi par exemple de nombreuses affections cancéreuses hématologiques dont les classifications ont beaucoup varié. Ceci ne facilite pas les études rétrospectives. Le diagnostic anatomopathologique lui-même n'est pas facile dans certaines maladies comme le mésothéliome, ce qui a justifié la création d'un groupe national d'experts. Le problème posé est qu'il est difficile de rechercher des étiologies à des maladies dont la définition a varié dans le temps et encore plus à des entités de symptômes

plus ou moins bien définis, comme la fibromyalgie ou plus récemment ce que ses « victimes » appellent « l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques » .

Des nuisances

La définition et l'évaluation des nuisances pour un individu donné ou pour un groupe est un problème bien connu des médecins du travail et des chercheurs, qu'il s'agisse de faire une évaluation des risques, de déterminer quelle surveillance médicale doit être appliquée à un individu ou quand l'objectif est de reconstituer des expositions dans un but de recherche.

Connaître et apprécier les nuisances (fréquence, durée, concentration, moyens de protection , voies de pénétration) est une question fondamentale, pour laquelle aucune réponse technique n'est idéale. Chacun connaît les aléas de l'interrogatoire, l'absence de mesures ou les interrogations sur leur représentativité. L'expertise individuelle des dossiers de personnes incluses dans des études est un processus long, personne dépendant. Les matrices emplois – expositions sont une autre façon d'évaluer les nuisances de personnes incluses dans des études. Les matrices sont restées longtemps assez peu répandues. Elles étaient souvent créées pour un usage particulier d'une étude avec une diffusion nulle ou très peu large. Il a été décidé, il y a quelques années, de créer une matrice emplois – expositions générale (Matgéné, « toutes activités et toutes nuisances ») au sein du département santé travail de l'InVS, qui répondra aux besoins de la surveillance épidémiologique et de l'épidémiologie explicative. Au sein de ce programme, il existe un volet concernant l'agriculture, Matphyto, en cours de création.

De la veille et de la recherche

La question de l'identification des facteurs des risques de l'environnement professionnel peut être abordée sur le versant de la veille ou sur celui de la recherche.

La veille est soit la surveillance épidémiologique soit une veille organisée selon les principes de la vigilance (pharmacovigilance, hémovigilance, matério-vigilance ou dans notre cas toxicovigilance).

Les techniques de surveillance épidémiologiques sont variées, analyses de données enregistrées en routine ou spécifiquement, ou systèmes ad hoc en entreprises ou en population. La surveillance épidémiologique permet en particulier de donner des informations sur l'évolution des maladies en terme de fréquence, éventuellement de déceler des agrégats de maladies dans une population.

Sur le plan de la veille, on trouve essentiellement en France deux systèmes, la toxicovigilance, le plus souvent associée aux centres anti-poisons qui recueillent des données à partir de questions posées par les demandeurs, données qui peuvent éventuellement être agrégées pour fournir des alertes. Il existe surtout depuis quelques années un réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles, organisé à partir des consultations de pathologies professionnelles des CHU, qui a commencé à produire des alertes à partir des problèmes de santé au travail fournit par les consultations. Ce réseau a d'abord été soutenu par la CNAMTS et l'AFSSET et l'est dorénavant par la MSA également. Un tel réseau permet de mettre en évidence des pathologies ou des nuisances émergentes et des couples pathologies/nuisances.

A partir des hypothèses générées par ces systèmes, des études à visées plus explicatives permettant de confirmer ou d'infirmer les hypothèses. La vigilance et la surveillance épidémiologique sont des approches plus complémentaires que concurrentielles, au sein desquelles le sens clinique et la curiosité des médecins conservent une place.

L'épidémiologie est la discipline de prédilection pour donner une réponse, quoique bien tardive, aux questions posées sur le lien entre facteurs de risques supposés ou suspectés (par la veille) et un effet sur la santé.

On distingue classiquement dans les études épidémiologiques à visée explicative, les études de cohortes et les études cas témoins. Les études cas témoins partent de la maladie et sont en général plus adaptées à des maladies rares, collectées dans les centres de soins, éventuellement de référence pour cette maladie.

Les cohortes prospectives sont envisageables dans certains cas, par exemple actuellement pour les effets neuro-comportementaux des pesticides. Les cohortes sont le plus souvent rétrospectives historiques. La population générale ou la population d'une ou plusieurs entreprises en est la base. La prévalence de la maladie dans la cohorte peut être faible comme dans une grande cohorte américaine sur la maladie de Parkinson, avec 413 malades après neuf ans de suivi parmi plus de 143 000 personnes incluses.

Quelque soit l'amélioration de la qualité technique des données (maladies et nuisances) et la sophistication des techniques d'investigation et d'analyse statistique, il n'en reste pas moins que les risques pouvant être mis en évidence sont d'un niveau sans doute plus faible que les risques découverts dans le passé. Il est encore plus nécessaire de bien maîtriser les autres paramètres, comme les facteurs de risque déjà connus des maladies, qu'il s'agisse de facteurs extrinsèques ou de susceptibilité. Le rapprochement de l'épidémiologie avec la biologie moléculaire et la génétique en témoigne actuellement.

Environnement professionnel et santé
des effets immédiats aux impacts à long terme, quels facteurs de risque savons-nous identifier ?

Alain Bergeret
Université Claude Bernard Lyon 1
UMR T 9405

De l'observation clinique à l'épidémiologie

- Observation d'effets immédiats, inattendus, spécifiques d'un xénobiotique, avec un lien de causalité fort, chez un individu
- Corrélation statistique entre une maladie et un facteur de risque actuel ou passé, en maîtrisant les autres facteurs de risque et les biais, dans une population

De l'observation clinique à l'épidémiologie

- La **médecine** a parmi ses objets de faire un diagnostic positif et éventuellement étiologique chez un individu
- L'**épidémiologie** a parmi ses objets d'identifier des facteurs de risque
- La **santé au travail** a parmi ses objets de dépister des affections liées au travail et de prévenir leur survenue

Caractérisation et bonne définition des maladies et des expositions

- Maladies
  - Diagnostic précis
  - Nomenclatures (CIM ou nomenclature particulière, FAB pour les leucémies par exemple)
    - Modification dans le temps
    - Imprécisions
    - Maladies mal systématisées

Caractérisation et bonne définition des maladies et des expositions

- Expositions
  - Intitulé d'emploi
  - Liste d'emplois
  - Liste de nuisances avec
    - Fréquence, durée, concentration,
    - Moyens de protection, voies de pénétration
  - Appréciation par expert
  - Matrices emplois-expositions
    - Matgéné en construction

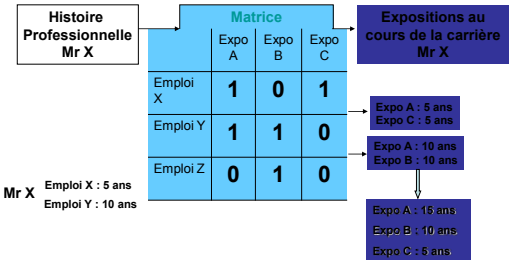
MATGÉNÉ : MATRICE EMPLOIS / EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES en POPULATION GÉNÉRALE

Une équipe multidisciplinaire :
hygiénistes industriels, épidémiologiste, statisticien
+ de nombreuses collaborations

Objectifs:
Décrire les expositions professionnelles en population générale (actifs ou retraités)

Pour mettre ces données professionnelles en relation avec des données individuelles de santé

Matgéné - *Utilisation*



Matgéné - *Matrices réalisées ou en cours*

- Poussières inorganiques: silice cristalline, ciment
- Poussières organiques : farine, cuir, céréales
- Solvants pétroliers (générique et par catégories)
- Fibres: laines minérales, amiante, céramique réfractaire
- Phytosanitaires (Matphyto)

Quel est l'objectif fixé ? Veille ou recherche ?

- Veille sanitaire en santé au travail
  - Surveillance épidémiologique
    - Programmes de surveillance de cohortes ad hoc
    - Surveillance de paramètres (indicateurs de santé) dans la population (générale ou une partie)
  - Réseaux de vigilance
    - CAP, toxico-vigilance
    - RNV3P

RNVPPP

- Réseau des consultations de pathologie professionnelles de France en partenariat avec CNAMTS et CRAM, l'AFSSET et la MSA
- Concept de problème de santé au travail (PST) : pathologie, nuisances, imputabilité, métier, branche professionnelle
- Exportation de données régionale et nationale d'observations d'intérêt
- Validation des données, homogénéité des codages, imputabilité

RNVPPP - suite

- Veille structurée de quelques pathologies
- Mise en place d'activités de recherche en méthodologie d'analyse des données
- Expérience d'extension du réseau en services inter-entreprises de santé au travail

Missions du réseau

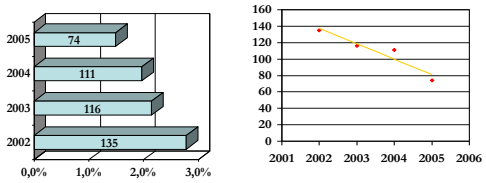
1- Veille épidémiologique programmée :
- Sur des pathologies pré-définies :
  - Contraintes psychologiques et organisationnelles
  - Asthmes
  - Cancers
  - TMS
- Suivi temporel : évolutions systématiques ?

2- Mise en évidence de pathologies et/ou nuisances émergentes

Missions de veille épidémiologique programmée

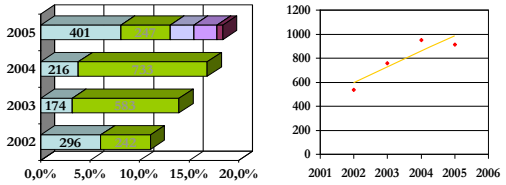
- A partir du réseau RNVPP :
  - suivi des prévalences annuelles, outils statistiques de tendance.

Couples Pathologie – Nuisance en diminution
Asthmes et hyperréactivité bronchique / Poussières



- *Test de tendance significatif, diminution linéaire*

Couple Pathologie – Nuisance en augmentation
Contraintes psychologiques et organisationnelles



Test de tendance significatif, croissance linéaire.

Interprétation des couples pathologies –nuisances émergents en fonction de la connaissance a priori de l'association

- **Étude des 100 associations générant le plus fort signal (PRR)**
  - 91 connues de façon certaine
  - 3 des 9 couples restants semblent intéressants à explorer : trichloréthylène et K rein, phytosanitaires et K prostate, phytosanitaires et sarcome.
- **Étude des 62 associations correspondant à des tumeurs malignes**
  - 31 des 37 associations connues génèrent un signal avec au moins 2 tests (83%)
  - 9 des 19 associations **non** connues (47%) génèrent un signal avec au moins 2 tests : LNH et solvants (n=9), K amygdale et amiante, CBP et nombreuses nuisances (phytosanitaires, mycotoxines, formaldéhyde, poussières de bois, huiles de coupe)
  - 6 associations non interprétables (défaut de précision du codage)

Autres exemples d'associations potentiellement émergentes

- Sclérodermie systémique et solvants (en particulier solvants aliphatiques halogénés et solvants aromatiques dont les dérivés halogénés)
- Tumeur maligne de la glande parotide et rayonnements ionisants
- Modifications de formule sanguine et exposition aux solvants : agranulocytose (n=6), thrombocytémie essentielle, thrombopénie, anémie
- Syndromes myéloprolifératits ou lymphoprolifératifs et solvants
- Granulomatose de Wegener et silice

Quel est l'objectif fixé ?

- Épidémiologie explicative
  - Cohortes ou cas-témoins
    - Bonne définition de la population
  - Nécessaire bonne définition des maladies
  - Nécessaire bonne évaluation des expositions
  - Nécessaire bonne prise en compte des facteurs confondants, des facteurs de risque non professionnels
  - Apport d'autres disciplines (génétique, biologie)

Les critères de Hills et coll (1989) sont admis pour évaluer la cancérogénicité des substances chimiques. Ils incluent : • La puissance de l'association en terme de significativité. • La reproductivité de l'association par différents groupes et différentes cohortes, • La spécificité de l'association nécessitant des travaux précis impliquant chaque variété de maladie avec un toxique, • La chronologie de l'association, • La relation avec l'intensité de l'exposition, • La plausibilité biologique, • Les évidences expérimentales comme la régression de l'incidence des leucémies chez les cordonniers après diminution de la concentration du benzène dans les colles par exemple.	

Des nouveaux produits dans notre environnement : les particules nanostructurées

Mr Bernard CATHALA

Institut National de la Recherche Agronomique,
Unité Biopolymères Interactions et Assemblages, équipe Assemblages Nanostructurés

Rue de la Géraudière
44316 Nantes cedex
cathala@nantes.inra.fr

1. Introduction

Les nanotechnologies et les nanosciences constituent des domaines de recherches et d'innovation en plein essor. La recherche a produit des avancées significatives et différents produits basés sur ces technologies sont déjà sur le marché aussi bien dans le domaine des matériaux, la cosmétique, la médecine et bien d'autres domaines. Ces produits affectent et affecteront notre environnement. Une des particularités des nanosciences est d'être par définition extrêmement pluridisciplinaire rendant la compréhension et l'identification du champ et de ses enjeux relativement difficiles. L'objectif de cet exposé n'est pas de faire une description exhaustive de ce champ scientifique mais de présenter tout d'abord de façon générale le contexte scientifique et socio-économique des nanosciences et d'illustrer à travers des exemples quelques avancées scientifiques récentes.

2. Quelques éléments sur les nanosciences et nanotechnologies

2.1 Origine et définition des nanosciences et nanotechnologies :

Alors que les nanosciences et nanotechnologies ont réellement émergé dans les années 1990, l'origine de ces domaines de recherche est attribuée à Richard Feynman (Prix Nobel de physique 1965). Lors d'un discours devenu historique au California Institute of Technology (Caltech) en 1959 (1), Feynman proposa d'ouvrir un nouveau champ scientifique en explorant l'infiniment petit (« there's plenty of room at the bottom ») et d'organiser la matière atome par atome. En fait, la réalisation de cette « vision » ne sera possible que par l'évolution des techniques et les avancées scientifiques qui seront réalisées dans les années 80 entraînant l'explosion des nanosciences. On cite souvent comme avancée majeure, la mise au point du microscope de force atomique qui a permis la visualisation d'atomes individuels et de façon associée le développement des méthodes de lithographie qui ont généré de nouvelles micro et nanostructures.

En première intention, les nanosciences et les nanotechnologies sont définies, pour les premières, comme l'étude d'objets de taille variant entre 1 et 100 nm (1nm = 10^{-9} m) alors que les nanotechnologies correspondent à l'ensemble des techniques permettant de fabriquer, d'observer ou de mesurer ces objets. Cette définition, qui est la plus fréquemment rencontrée, masque toutefois une des singularités de ces domaines qui est que la diminution de taille des objets manipulés induit de nouvelles propriétés qui, pour certaines, n'existent pas aux échelles supérieures d'organisation. Deux exemples peuvent illustrer ceci :

- *Les Quantum dots* (ou puits quantiques) (2) sont des nanoparticules composées par des cristaux semiconducteurs de dimensions nanométriques souvent enrobés dans une coque de polymère qui présentent des propriétés de fluorescence ajustables par le contrôle de leur diamètre. En effet, à partir d'une même longueur d'onde d'excitation dans l'ultraviolet, des nanoparticules de même composition réémettent des photons dans le spectre visible, avec une longueur d'onde qui va du rouge au bleu quand leur taille diminue. Ces propriétés remarquables en font de très bons candidats comme marqueurs photoluminescents susceptibles de remplacer avantageusement les colorants organiques. De plus, leur très forte luminescence permet théoriquement de visualiser une particule unique.

- *Les films multicouches de polymères permettant la création de couleur sans colorant.* L'empilement de couches de taille nanométrique de polymères possédant des indices de réfraction différents peut provoquer, lorsqu'une lumière blanche est réfléchie par cette surface, l'apparition d'une couleur (3). Celle-ci est due comme dans le cas des ailes de papillons, à des interférences négatives liés aux réflexions aux

multiples interfaces entre les couches. La couleur peut être modulée à la fois par l'indice de réfraction des couches (lié à structure du polymère déposé), à l'épaisseur et le nombre de couches. Ces propriétés ont été obtenues grâce des polymères synthétiques et naturels (cellulose notamment).

Ces deux exemples montrent bien qu'il faut intégrer dans la définition des nanociences la relation entre taille et propriété. Par conséquent on peut définir les nanosciences comme l'étude des phénomènes observés pour des objets dont la taille est de quelques nanomètres et dont les propriétés découlent spécifiquement de cette taille nanométrique.

2.2 Domaines d'application des nanotechnologies :

Comme le laisse supposer la définition précédente, les domaines d'application des nanotechnologies sont très divers. Bien entendu, la microélectronique reste le domaine de prédilection des nanotechnologies, mais des domaines comme la pharmacie, la cosmétique ou bien entendu le domaine des matériaux ont vu apparaître des produits « nano » très récemment. Il faut toutefois distinguer dans ce marché les produits issus des nanotechnologies "*évolutionnaires*" qui améliorent des produits ou processus existants en y insérant des composants plus petits, ou bien en exploitant les possibilités offertes par la matière à l'échelle nanométrique. Par exemple, l'incorporation de nanocharges dans les composites améliore la propriété du matériau en augmentant la dispersion et les qualités d'interface, en utilisant les mêmes principes que ceux applicables aux charges dispersées de taille supérieure. A l'inverse, les nanotechnologies "*révolutionnaires*" qui visent à fabriquer, atome par atome ou molécule par molécule, systèmes, outils et produits représentent une véritable rupture technologique et scientifique. Elles restent souvent visionnaires et encore hypothétiques. Ce sont les premières qui constituent aujourd'hui l'essentiel du marché des nano, et sont largement utilisées. Les nouveaux produits de consommation utilisant les nanotechnologies ne cessent d'arriver sur le marché, à raison de trois à quatre par semaine, d'après le premier inventaire mondial tenu par le PEN (Project on Emerging Nanotechnologies). Le nombre de produits "nano" commercialisés est passé de 219 à 600 depuis mars 2006. Les produits de santé et de soins, dont font partie les crèmes solaires et les cosmétiques, sont les plus nombreux et représentent 60 % du total (4).

L'agriculture et l'industrie agroalimentaire sont bien entendu concernées par l'arrivée de ces nouveaux produits nano. Ainsi toutes les grandes entreprises alimentaires (Unilever, Nestlé, Kraft, etc..) ont des programmes pour le développement de nouveaux aliments incluant nanoparticules (nanoémulsions, nanoparticules pour le relargage contrôlé) ou de nouveaux procédés de fabrication issus des nanotechnologies (procédés de nanofiltration sélective, emballages nanostructurés pour limiter les effets de diffusion des gaz par exemple) (5). Les objectifs de ces modifications sont de façon générale soit l'amélioration des produits et des procédés (gustatives, texturales ou bien optimisation des procédés) soit le développement de nouvelles propriétés (nutritionnelles, diminution de l'allergénicité). Toutefois, l'essor de ces produits est certainement à l'heure actuelle encore freiné par les coûts supplémentaires induits lors des fabrications et par l'acceptabilité des produits « nano » par les consommateurs.

Pour ce qui concerne l'agriculture, le PEN (Project on Emerging Nanotechnologies) a recensé 160 projets portant essentiellement sur la création de surfaces biosélectives, des procédés de relargage de produits actifs (pesticide, herbicide,…) et sur l'élaboration de procédés nanotechnologiques permettant une transformation optimisée de la matière première (biocarburants par exemple). Au-delà de ces projets spécifiquement dédiés à l'agriculture, celle-ci sera certainement confrontée aux matériaux contenant des nanoparticules ou aux nanoparticules relarguées dans l'atmosphère par d'autres activités.

L'ampleur de ces résultats est à la dimension des investissements fournis par les états qui se sont tous dotés de moyens d'actions spécifiques pour ce secteur que beaucoup jugent stratégique. Ainsi, dés 2000, les Etat-Unis ont lancé la NNI (National Nanotechnology initiative). Cet effort, d'une ampleur budgétaire considérable vise à assurer aux Etats-Unis la prééminence dans ce domaine. Des programmes analogues ont depuis été mis en place dans les grands pays industrialisés notamment en Allemagne (leader européen du domaine) et au Japon. En France, les programmes de recherche sur les nanotechnologies font partie intégrante des programmes de l'ANR. De même la communauté européenne soutient ces thématiques de recherche de façon importante dans les 6ème et 7ème programmes cadre.

3. Quelques exemples de nanostructure

3.1 La nature un modèle d'assemblages nanostructurés performants :

Au delà des assemblages élaborés par l'homme, la nature, au fil de l'évolution, a créé des objets structurés à l'échelle nanométrique possédant des propriétés tout a fait remarquables. De plus, ces assemblages sont autant de structures modèles pour l'homme permettant de créer de nouveaux matériaux. Une meilleure connaissance de l'organisation à l'échelle nanométrique des matières premières permet également de mieux les exploiter. Deux exemples peuvent illustrer ces approches :

- La super adhésion du gecko : Le premier exemple très largement étudié est le Gecko. Le Gecko est un lézard qui présente des capacités d'adhésion tout à fait remarquables puisqu'il est non seulement capable d'adhérer à des surfaces parfaitement lisses, mais également de se déplacer dessus à des vitesses très rapides quelle que soit sa position. Actuellement différentes études sont en cours pour comprendre les mécanismes sous-jacents et développer des matériaux biomimétiques ayant des performances identiques. Des scientifiques américains ont démontré que les propriétés d'adhésion de ces lézards s'expliquent par un mécanisme mettant en jeu des forces d'attraction de van der Waals (6,7). La liaison de van der Waals est très faible et se produit entre les moments dipolaires d'atomes ou de molécules. En fait, les doigts des pattes du gecko sont terminés par des millions de poils (appelés sétules ou *setae*) composés de kératine et dont le diamètre à la base est de quelques dizaines de microns. A leur extrémité, ces poils se scindent eux-mêmes en poils encore plus fins, de quelques centaines de nanomètres de diamètre, qui se terminent par une structure en spatule. Ces spatules se conforment à la surface au niveau moléculaire ce qui a pour effet de maximiser les forces de van der Waals. Les remarquables propriétés d'adhésion du type de gecko résultent donc de la taille nanométrique et de la forme des extrémités de ces poils et pas du tout de la nature chimique de la surface.

- L'orientation des fibrilles de cellulose du bois est à l'origine de ses propriétés mécaniques : Le bois est un matériau composite extrêmement performant au regard de sa très faible densité. Ces propriétés mécaniques sont dues à une structure hiérarchisée dont l'élément de base est la paroi végétale. Cet édifice correspond à une structure extracellulaire élaborée par la cellule durant sa vie et est constitué d'une phase amorphe enrobant un élément rigide la microfibrille de cellulose qui est elle-même formée de cristaux de cellulose de taille nanométrique. Les microfibrilles de cellulose sont disposées de façon orientée dans la paroi. La cellule module les propriétés de résistance en traction en ajustant l'angle existant entre les microfibrilles et l'axe de la cellule. En fonction de ses besoins physiologiques (réorientation de branche ou de tige, type cellulaire,…), la cellule peut modifier la position des microfibrilles et ainsi réagir à différents stimuli. La compréhension des mécanismes de formation de ces structures et

leur impact sur les procédés technologiques (séchage, sciage fractionnement chimique, production de la pâte à papier) permettront d'optimiser l'utilisation de cette ressource.

3.2 Les nanoparticules :

Les nanomatériaux sont utilisés dans de nombreux domaines d'application. Par définition, ils sont constitués ou contiennent des particules de taille nanométrique afin d'optimiser les propriétés des matériaux ou créer de nouvelles fonctions. Ainsi, à masse constante, la diminution de la taille entraîne une croissance considérable du nombre de particules et par conséquent de la quantité de surface associée. Cela modifie notamment la dispersion des particules dans la matrice entraînant une augmentation des propriétés mécaniques s'il s'agit de particules rigides, la réactivité pour les catalyseurs (plus de sites réactifs accessibles) ou bien encore les propriétés électriques dans le cas de matériau conducteur (modification des zones de joints de grains). L'introduction de particules possédant des fonctionnalités comme les quantums dots ou bien encore les nanotubes de carbone permettent de fabriquer de nouveaux matériaux. Ainsi, l'introduction de nanotubes dans un matériau isolant modifie la conductivité électrique de façon drastique même à de quantité faible. Les familles de nanoparticules sont nombreuses et issues de procédés à la fois évolutionnaires qui fractionnent la matière jusqu'à l'échelle nanométrique (dioxide de titane, argiles) et de procédés directement issus de la recherche récente donnant lieu à de complètement nouvelles particules (nanotube de carbone, fullerène, quantum dots). En reprenant la nomenclature utilisée par l'AFSSET dans son rapport de 2006 (8) et celle donnée par l'INERIS (9), on peut classer les nanoparticules en fonction de leur forme d'utilisation :

- les particules qui sont utilisées sous forme de poudre ou de poudre ultrafines (naoparticules d'or, quantum dots, fullerène).

- les nanofils ou nanotubes : ce sont également des particules également isolées mais de forme cylindrique dont la longueur peut être parfois micrométrique seul le diamètre restant nano (nanotube de carbone, microcristaux de cellulose).

- Les matériaux sous forme de couches minces. Le matériau est déposé sur une surface, la taille du dépôt ou les couches de dépôts étant nanométriques. Ces matériaux peuvent avoir différentes applications telles des propriétés optiques, résistance au choc, auto-nettoyage.

- Les matériaux massiques : ces matériaux sont généralement des nanocomposites. La majorité des nanoparticules utilisées visent à améliorer les propriétés mécaniques, de légèreté ou de durabilité.

Au-delà de cette description, il faut bien garder en mémoire que la nature, la taille et l'état de surface des nanoparticules sont extrêmement variés et que tous ces paramètres influencent l'interaction avec un organisme vivant et l'environnement. En outre, il faut également souligner que les nanoparticules dispersées dans l'environnement ne sont pas toutes manufacturées mais proviennent pour la majorité soit de phénomènes naturels (volcanisme par exemple) ou d'activités humaines (transport automobile).

L'évaluation des risques associés à la dissémination de ces particules dans l'environnement est en cours. Plusieurs projets européens et français ont pour objet l'appréciation de ces risques et la mise au point de tests spécifiques. Il faut noter que la recherche européenne est particulièrement en avance comparativement aux Etats–Unis qui investissent deux fois moins dans le domaine (10). Toutefois, la grande variété des types de particules et la difficulté de la repérer rendent délicates les études épidémiologiques en cours. Des informations détaillées et récentes pourront être

trouvées dans les documents de l'AFFSET (8), de l'IRSST (11), sur le site de l'INERIS (9) et ainsi que dans la revue récemment publiée par l'université d'Edinburgh (12).

A titre d'exemple, on peut citer les résultats obtenus par différentes équipes sur les nanotubes de carbone. Les nanotubes de carbone ont été découverts en 1991 par S. Iijima (13) qui a eu la curiosité d'observer au microscope électronique un sous-produit de synthèse qui se présentait comme un dépôt noirâtre dur et filamenteux et a découvert dans ce dépôt les nanotubes, qu'il a identifiés comme étant des objets tubulaires fermés en leurs extrémités et constitués de carbone cristallisé. La longueur des nanotubes peut atteindre plusieurs microns alors que leur diamètre est de l'ordre du nanomètre et est typiquement compris entre 1 et 10 nm. Les nanotubes peuvent posséder un seul feuillet ou bien être constitués d'une feuille de graphène enroulée sur elle-même (comme une feuille de papier) donnant naissance à une structure multifeuillet. Structures à la fois robustes, légères et souples, les nanotubes de carbone possèdent des propriétés mécaniques et électriques remarquables qui offrent de nombreuses potentialités d'applications. De ce fait, ils ont été et restent l'objet de nombreuses études à travers le monde et sont souvent montrés comme l'emblème des nanosciences. A ce titre, ils ont fait l'objet d'études toxicologique qui restent encore incomplètes étant donné l'ampleur du travail à accomplir. A l'heure actuelle, certains travaux tendent à montrer que la taille des nanotubes est un facteur important, l'étude nanotube long montrant en effet une biopersistance supérieure à celle des nanotubes courts. D'autres études semblent indiquer que les nanotubes courts sont piégés par les macrophages et ne pénètrent pas dans le sang. Ces résultats doivent être relativisés par le fait que d'une part la totalité de la variabilité des nanotubes n'a pas été explorée et d'autre part, que la connaissance et la compréhension des propriétés des nanotubes sont elles-mêmes incomplètes et avancent chaque jour.

4. Conclusion

Les nanosciences et nanotechnologies sont des domaines de recherche émergents qui ouvrent de nouvelles perspectives technologiques et d'applications qui vont certainement avoir des conséquences sur notre vie quotidienne et notre environnement. Elles s'inscrivent dans une continuité de recherches liées à l'apparition de nouvelles technologies et de nouveaux concepts. A ce titre, et comme pour toutes les avancées scientifiques, il faudra évaluer les nouveaux risques encourus et estimer le ratio bénéfices/risques pour développer ces nouvelles applications.

5. Références

1 Discours de R. Feynamn : http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html

2 Medintz, I.L. ; Uyeda H.T. ; Goldman E.R. ; Mattoussi H. (2005) Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing. *Nature Materials* 4, 6 435-446,

3 Cranston, E. D. & Gray, D. G. (2006). Morphological and Optical Characterization of Polyelectrolyte Multilayers Incorporating Nanocrystalline Cellulose. *Biomacromolecules* 9, 2522-2530.

4 Project on emerging nanotechnology
http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/

5 http://www.forbes.com/investmentnewsletters/2005/08/09/nanotechnology-kraft-hershey-cz_jw_0810soapbox_inl.html

6 Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. C. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. N. & Full, R. J. (2002). Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99, 12252-12256.

7 Autumn, K. (2006). How gecko toes stick - The powerful, fantastic adhesive used by geckos is made of nanoscale hairs that engage tiny forces, inspiring envy among human imitators. *American Scientist* 94, 124-132.

8 Rapport de l'AFSSET : Les Nanomatériaux. Effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement (Juillet 2006)

9 Différents documents sur les nanoparticules sont disponibles sur le site de l'INERIS (http://www.ineris.fr/)

10 http://www.nanotechproject.org/news/archive/ehs-update/

11 Rapport de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) : Les effets à la santé reliés aux nanoparticules (Mars 2006) (www.irsst.qc.ca)

12 Duffin, R., Mills, N. L. & Donaldson, K. (2007). Nanoparticles - A thoracic toxicology perspective. *Yonsei Medical Journal* 48, 561-572.

13 Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354, 56-58.

Nanosciences et nanotechnologies : de nouveaux champ scientifiques ?

Des nouvelles particules dans notre environnement

B. Cathala

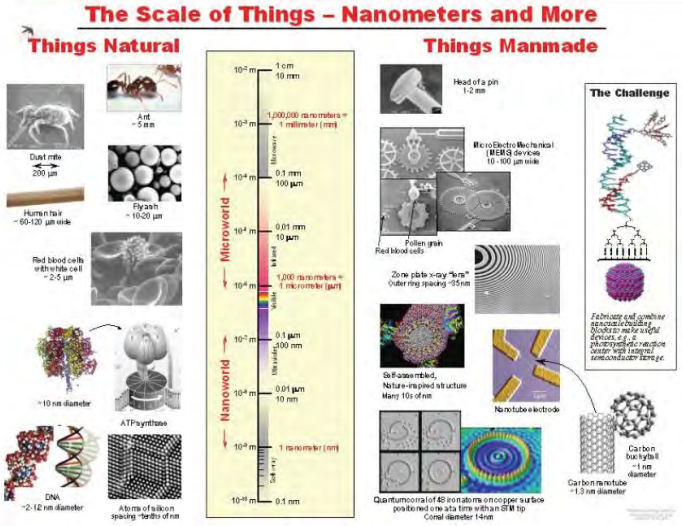
INRA, Nantes

cathala@nantes.inra.fr

Sommaire

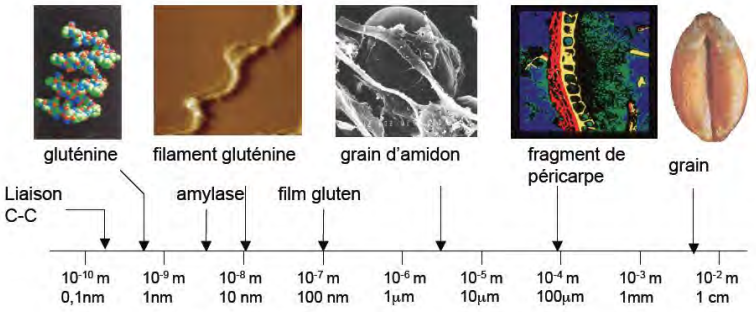
- ✓ Nano ...?
- ✓ Une mode passagère ou réalité industrielle ?
- ✓ Les nanotechnologies dans l'agriculture
- ✓ Les risques
- ✓ Conclusion

Les échelles



Les échelles

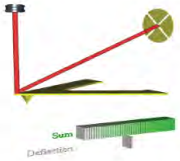
- Analyse à différentes échelles d'espace et de temps



domaine peu exploré

Historique et définition

1949 : « there is plenty of rooms at the bottom »
discours de Richard Feynman à Caltech

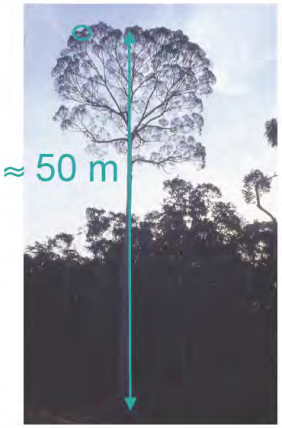


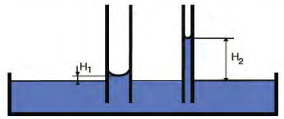
Dans les années 80 sont apparues des techniques d'investigation de l'échelle nano tel que la microscopie de force atomique, la microscopie à effet tunnel, etc…

Les nanosciences et nanotechnologies doivent conduire à une meilleure compréhension, à un niveau fondamental des phénomènes opérant à une échelle de longueur approximativement du **nanomètre à quelques centaines de nanomètres**. Elles doivent permettrent de créer et d'utiliser des structures et des systèmes qui ont des **propriétés et des fonctions nouvelles intrinsèquement liées à ces faibles dimensions**. Les nanosciences et les nanotechnologies incluent **la manipulation contrôlée de structures nanométriques et leur intégration dans des matériaux, composants, systèmes ou architectures plus complexes**. Dans ces édifices plus larges, le contrôle et la construction de ces structures restent à l'échelle nanométrique. »

Echelles et propriétés

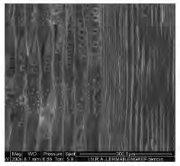
Stomates = évaporation





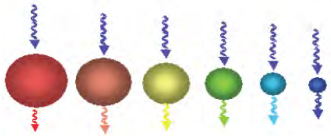
Saut de pression et remontée capillaire à 20°C pour différents rayons de ménisque.

Rayon du capillaire	ΔP (Pa)	ΔH
1 mm	$1{,}46.10^{+2}$	1,44 cm
100 µ	$1{,}46.10^{+3}$	14,4 cm
10 µ	$1{,}46.10^{+4}$	1,44 m
1 µ	$1{,}46.10^{+5}$	14,4 m
100 nm	$1{,}46.10^{+6}$	144 m



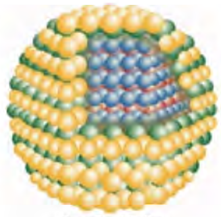
Source Patrick Perre ENGREF, Nancy

Echelles et propriétés



Nanocrystals absorb light then re-emit the light in a different color – the size of the nanocrystal (at the Angstrom scale) determines the color

Six different quantum dot solutions are shown excited with a long wave UV lamp

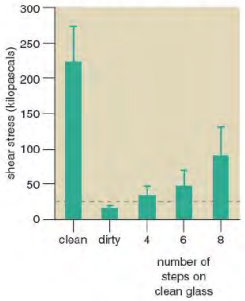


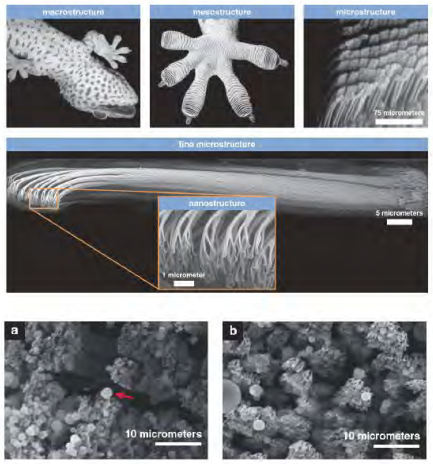
Core-Shell EviDot

Des propriétés de fluorescence unique et variable selon la taille de la particules

Echelles et propriétés

Une structure hiérarchisée jusqu'à l'échelle nanométrique pour des surfaces superadhésives et autonettoyantes





Des exemples

Propriétés des nanotubes de carbone

Taille	0.6 -2 nm de diamètre	la lithographie par ME = 10-50 nm
Densité	1.33-1.44 g/cm^3	Aluminium 2.7 g/cm^3
Résistance à la rupture		
	45 10^9 Pascal	Acier haute résistance 2 10^6 Pa
Capacité électrique		
	1 10^9 A/cm^2	Fil de cuivre 1 10^6 A/cm^2
Stabilité à la température		
	> 750 °C dans l'air	Fil métallique 600 - 1000°C

+ Des propriétés isolantes thermiques, de résilience,...

Sommaire

- ✓ Nano ...?
- ✓ Une mode passagère ou réalité industrielle ?
- ✓ Les nanotechnologies dans l'agriculture
- ✓ Les risques
- ✓ Conclusion

Les enjeux

Des enjeux scientifiques qui induisent une structuration forte ...

- UE a développé un programme spécifique au sein du 6ème PCRD (2000). L'effort est poursuivie sur le 7ème PCRD

- Forte structuration en Allemagne (leader européen)

- USA : Nano initiative (http://www.nano.gov/) (1996)
  Rapport de l'USDA sur les Nanosciences: « Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems » (2003)

- France (démarrage plus tardif)
  - coordination du ministère de la recherche (ACI), CEA, CNRS et maintenant de l'ANR
  - création en 2005 des Centres régionaux de compétence en nanosciences (Cnano).

Les enjeux

Des enjeux scientifiques qui induisent une structuration forte pour des enjeux économiques importants

Le marché des nanobiotechnologies est estimé à 300 Milliards de dollars sur les 12 prochaines années

Inventaire du PEN (Project on Emerging Nanotechnologies): les produits nano commercialisés sont actuellement plus de 600 sur le marché (notamment cosmétique).

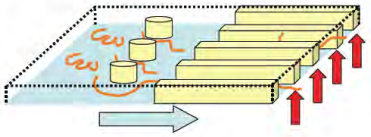
Exemple des nanocomposites :
- Ils occasionnent un surcoût, mais améliorent les performances (propriétés mécaniques, légèreté, perméabilité, longévité,limitation de la sensibilité à l'eau...) donc visent les marchés à fortes valeurs ajoutées

La phase purement prospective/recherche est dépassée.

Des exemples

La microfluidique

Détection de molécule individuelle (protéine, ADN,..)
par microfluidique pour abaisser à la fois les limites de sensibilité et les temps d'analyse.
(dosage de protéines, contaminants ou bien de constituants d'intérêts)



détection

Flux

Il faut à la fois maîtriser l'appareillage (peigne, systèmes solvants) mais également développer de nouveaux concepts pour résoudre les problèmes posés par l'échelle.

Intégration dans des dispositifs « lab on a chip »

Des exemples

Lab-on-a-chip

- Features
  - Miniaturisation
  - Automation
  - Integration
- Benefits
  - Data Quality/Reproducibility
  - Reagent savings

Intégrer sur un dispositif centimétrique voire millimétrique des éléments de détection et de dosage de substances biologiques :

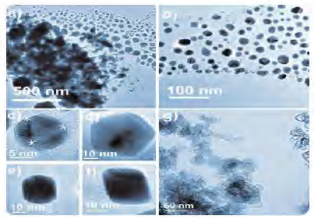
Protéines

ADN

Sucre

Lab on a chips « Agilent » pour le dosage de protéines, ADN, etc...

Des exemples



Nanoparticules d'argent (bactéricide)

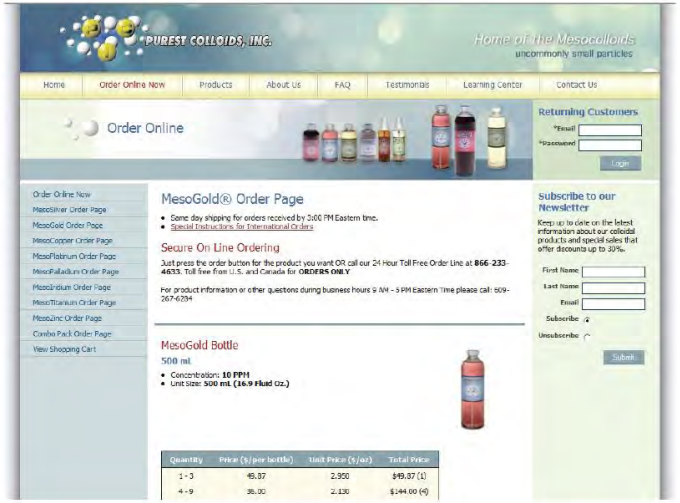
Les nanoparticules

Origine, taille, forme fonctionnalités extrêmement variés qui peuvent en raison de leur taille pénétrer jusque dans les cellules

- Université de Clemson (USA) incorpore des nanoparticules de polystyréne biocatives dans l'alimentation animale pour remplacer les antibiotiques.

- Nestlé, Unilever recherche des nanoparticules ou capsules capables de protéger une substance pouvant modifier l'apparence, le goût ou encore la fonctionnalité d'un aliment

Des exemples

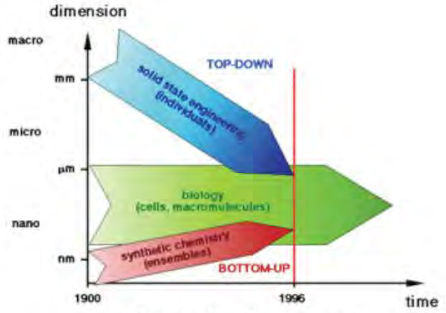


Sommaire

- ✓ Nano ...?
- ✓ Une mode passagère ou réalité industrielle ?
- ✓ Les nanotechnologies dans l'agriculture
  - ✓ Approches « top down »: capteurs, systèmes de suivi de la qualité
  - ✓ Approches « bottom up » : les nouvelles production et les nouveaux outils de production
- ✓ Les risques
- ✓ Conclusion

« Top down » et « bottom up »

Approche Top down :
Un matériau massique est réduit pour atteindre des tailles à l'échelle nano et ainsi pouvoir donner lieu à des dispositifs miniaturisés



Approche Bottom up:
des structures sont réalisées à partir d'élément de taille nanométrique

Approche top down 1/4

✓1 - Les biocapteurs

✓Détection de marqueurs : Intégration dans un système automatisé miniaturisé de test multidétection pour le suivi de molécules d'intérêt

- ✓ pathogènes :Utilisation de lab on a chip directement pour identifier le pathogène et pouvoir adapter le traitement
- ✓ Suivi des cultures et élevages et adaptation des itinéraires techniques
- ✓ ...

Échéance rapide mais dépendante du coût

Approche top down 2/4

✓2-Systèmes intelligents pour la localisation, information et contrôle
Mise en réseau de systèmes de biocapteurs, de systèmes de localisation d'analyse et d'action

- ✓ Élaboration de systèmes NEMS (Nano-Electromechanical Systems qui perçoit ou reçoit un signal
- ✓ Développement des systèmes d'intégration, positionnement et mise en réseau de ces systèmes
- ✓ Application dans la production agricole mais également dans la surveillance de l'environnement (étude en cours sur la croissance d'arbre en relation avec condition atmosphérique locale).

Echéance à moyen terme

Approche Top down 3/4

✓3 - Dispositifs intelligents ou réactifs pour l'application de principe actif

Détection et traitement précoce de maladie ou de stress culturaux

✓Fonctionnalité :
- ✓Fertilisant
- ✓Pesticides,
- ✓antibiotiques
- ✓....

✓Paramètres visés :
- ✓ Relargage contrôlé ou retardé dans le temps
- ✓Spatialement répartis
- ✓Stimulable ou contrôlable

Intégration de systèmes électroniques et de nanoparticules

Échéance rapide mais dépendante du coût

Approche top down 4/4

✓4 - Suivi de la traçabilité

✓Le développement de dispositifs associé à la culture durant toute sa vie (production + transformation) permet de tracer son histoire

- ✓ suivi de chaîne du froid ou de la date de péremption
- ✓ suivi de contamination OGM
- ✓ ...

Objectif : augmentation de la qualité sanitaire
Contrainte : Échéance rapide mais dépendante de la réglementation et de la demande

Approche bottom up 1/2

✓1- Matériaux nanostructurés à base de polymère agricole

✓Le développement des nanosciences permet une meilleure connaissance de la structure des assemblages biologiques, ce qui permet :

- ✓ un meilleur fractionnement de la matière
- ✓ production de nouveaux matériaux à partir d'agropolymère avec de propriétés optimisés (feuille de lotus)

Objectifs : nouveaux débouchés, ressources renouvelables, stockage du C

Contrainte : Échéance à moyen terme dépendant du coût du pétrole

Approche bottom up 2/2

✓2 - Nouveaux procédés de transformation

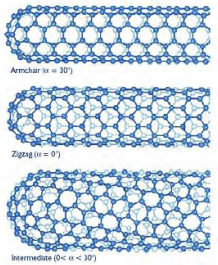
- ✓ Procédés de filtration membrane nanoporeuse
- ✓ Surfaces bioactives (super hydrophobes ou bien bactéricides)
- ✓ Nouveaux matériaux d'emballage (protecteur, intelligent)
- ✓ ...

Échéance rapide mais dépendante du coût et de l'acceptabilité

Sommaire

- ✓ Nano ...?
- ✓ Une mode passagère ou réalité industrielle ?
- ✓ Les nanotechnologies dans l'agriculture
- ✓ Les risques
  - ✓ sanitaires : les nanoparticules
  - ✓ Économiques, éthiques et sociétaux
  - ✓ les chimères
- ✓ Conclusion

Les nanoparticules



Les nanoparticules

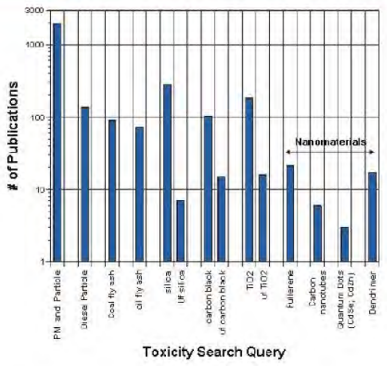
Les nanoparticules
(rapport afsset : les nanomatériaux : effet sur la santé de l'homme et sur l'environnement, juillet 2006)

✓1337 nano particules répertoriées à partir de 90 producteurs

✓Elles entrent dans la constitution des nanomatériaux, des capteurs, la santé (animale ou humaine), la cosmétique et l'alimentation (animale ou humaine) ou l'agriculture

✓ Bref, une forêt de nanoparticules à ajouter à celles qui existent depuis déjà bien longtemps
- ✓ production de noir de carbone a été estimé à 200 000 tonnes en 1995
- ✓ une seule usine française peut produire 100 000 t/an de silice (taille < 100 nm)
- ✓La production de nanoparticules d'origine volcanique est de l'ordre de 40 000 t/an
- ✓ la production mondiale de nanotube de carbone est de l'ordre de 400 t/an

Les risques sanitaires



Source « US Environment protection Agency »: livre blanc sur les nanotechnologie, 2007

Les risques sanitaires

✓Les nanoparticules

✓Toxicologie des nanomatériaux pour l'homme rapport irsst
Cf rapport de l'institut de recherche Robert Sauvé et en Sécurité du Travail (Québec) « Les effets de la santé reliès aux nanoparticules » (www.irsst.qc.ca, mars 2006) et rapport de l'affsset (les nanomatériaux: effet sur la santé humaine et sur l'environnement, Juillet 2006)

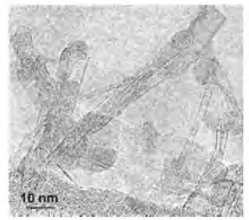
✓ 5 types de nanoparticules (fullerènes, nanotubes de carbone, nanoparticules inorganiques, organiques, nanocapsules). Recherche bibliographique des risques liés à :
- ✓ l'inhalation
- ✓ l'ingestion
- ✓ la pénétration cutanée

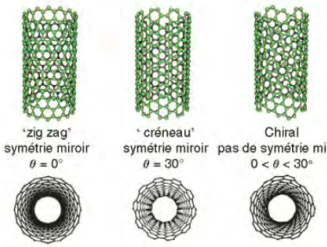
✓ La connaissance de la toxicité est très fragmentaire (quasiment aucune donnée sur l'ingestion, par ex).

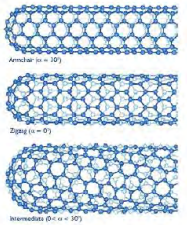
Lorsque les données existent, elles démontrent dans beaucoup de cas une pénétration des particules dans l'organisme et la contamination de plusieurs organes notamment au niveau du cerveau (migration le long des axones des nerfs).

Un exemple les nanotubes de carbone

Variabilité des nanotubes
-Taille
-Mono ou multifeuillet
- Etat d'association
-Enroulement
-....







http://www.onera.fr

Un exemple les nanotubes de carbone

Toxicité : Reste encore à identifier

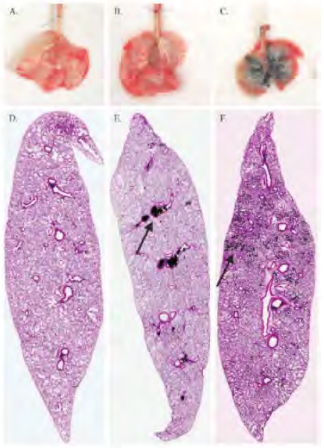
-Muller et al 2005

Toxicité pulmonaire des NTC multiparois:

-étude par inhalation à forte dose et forte fréquence. Il y a une biopersistance élevée des nanotubes « long » 590 nm et 70 (80 % pour les plus long, 40% pour les plus courts restent dans les poumons)

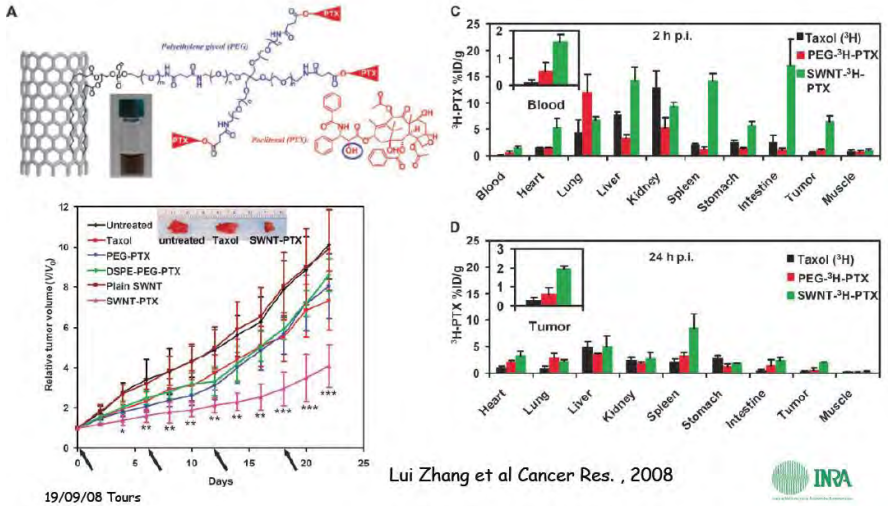
- Accumulation de NTC sous forme agglomérés

- au bout de 60 jours : inflammation et formation de granules



Un exemple les nanotubes de carbone

Nanotubes et médecine



Lui Zhang et al Cancer Res. , 2008

Les risques sanitaires

✓ Conclusions :

✓ La toxicité des nanoparticules n'est pas à sous-estimer, mais elle est méconnue et notamment au-delà de l'effet spécifique taille (particules fonctionnelles QD, magnétiques, post traitement anti agrégation, etc...)

✓Les données sont très limitées et parfois extrêmement contradictoires

✓ Les mesures du risque classique ne sont pas forcément adaptées (ex: la dose toxique des particules de taille micro est souvent exprimée par unité de masse alors dans le cas des nano, il faudrait prendre en compte également du nombre, de la surface spécifique, de la qualité de la surface, etc...)

✓ Évolution extrêmement rapide des technologies (donc de la variabilité des nanoparticules) rend difficile la généralisation

Les risques sanitaires : réglementation

Extrait du rapport de l'Affset :

« Il n'y a pas de réglementation spécifique sur les nanotechnologies mis à part aux état-unis.... »

Nanomatériaux et sécurité au travail (recommandation Affset)

Les conclusions des experts

On ne peut exclure l'existence d'effets sanitaires sur l'homme ni de conséquence sur l'environnement à la suite d'une exposition à des nanomatériaux :
Au vu des données de la littérature scientifique, l'existence de dangers potentiels pour l'homme et l'environnement liés à la toxicité, l'écotoxicité et au risque d'explosion ne peut être écartée. Ces dangers potentiels sont identifiés pour une exposition par voie cutanée, par ingestion ou, plus fréquemment, par inhalation.

Les experts recommandent de renforcer les mesures de prévention des expositions en milieu de travail.
Les experts constatent des difficultés métrologiques pour caractériser de manière pertinente l'exposition des professionnels qui manipulent des nanomatériaux. Les experts ont notamment mis en évidence le manque de méthodes de mesures adaptées aux nanomatériaux.
L'état des lieux des pratiques de prévention des entreprises et laboratoires qui manipulent les nanomatériaux montre que :

- ces entreprises ont d'ores et déjà mis en œuvre des moyens organisationnels, collectifs et individuels de prévention ;
- elles déplorent des difficultés métrologiques et méthodologiques pour garantir une évaluation pertinente des risques pour leur personnel ;
- les mesures de protection collectives et individuelles dans les laboratoires, sont davantage répandues que les mesures organisationnelles de prévention. (stockage, évacuation de déchets').

Les experts n'ont pas pu disposer des données relatives à l'exposition des populations riveraines.

Les risques sanitaires

✓ les recherches sont en cours:

✓ Deux programmes cadre européen ont été lancés et plusieurs nationaux (notamment sur la métrologie des nanoparticules).

✓ Tous les pays soulignent la nécessité de la législation, d'une métrologie et de méthodes de protection adaptées

✓ Permet aux minimum d'étudier les effets des nanoparticules en général (manufacturés ou pas).

Les impacts sociaux et éthiques

✓Un emballement généralisé contre-productif

✓Du côté des institutionnels

✓Rapport 2002 de la National Science Fundation

(Converging technologies for improving human performances (2002))

Unification des sciences, interaction pacifique entre hommes et machines intelligentes,..

✓Des acteurs

✓Scientifiques (nano = + de crédits)

✓Des journalistes (nano = plus de ventes)

Les impacts sociaux et éthiques

- ✓ Du côté de la société civile

Ex « les amis de la terre »

Aprés le nucléaire et les OGM, si nous ne nous occupons pas des nanotechnologies,elles s'occuperont de nous !Aprés le nucléaire et les OGM, un nouveau "front" s'est ouvert depuis quelques années dans la dévastation du vivant par la technologie issue du développement de la société industrielle : celui des nanotechnologies. Si la dimension physique des nanotechnologies est infime (de l'ordre du milliardiardeme de métre), ses retombées risquent bien d'être gigantesques et de bouleverser considérablement notre mode de vie avec, comme rapide et sombre perspective, le puçage des animaux et des êtres humains.

- ✓ Effet « bulle internet » : Technologies à très fort coûts de développement pour un marché relativement peu clair
- ✓ Problème éthique à ne pas négliger (déshumanisation, effet « big brother », déséquilibre Nord-Sud, aliment fonctionnel,...)
- ✓ Des chimères issues de l'imagination de quelques auteurs
  - ✓ Auto reproduction de nanorobots ...

Conclusions

✓ Une science et une technologie émergente, donc des risques associés émergents

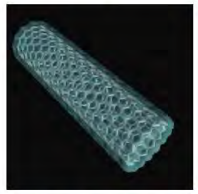
- ✓ Négatif
  - ✓ La toxicité des nanoparticules est quasi certaine
  - ✓ La réglementation et les mesures de protection ne peuvent être mises en place par manque d'étude
  - ✓ L'acceptabilité sociétale et l'investissement industriel ne sont pas assurés
- ✓ Positif
  - ✓ De réels progrès sont possibles
  - ✓ Le champ d'application est tellement large que seule l'ampleur du phénomène reste inconnue
- ✓ IL faut entreprendre une discussion et évaluer le ratio coût/bénéfice

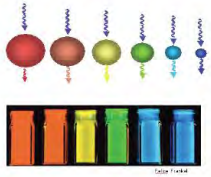
Merci de votre attention

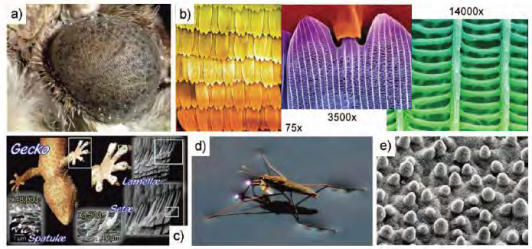
cathala@nantes.inra.fr

Nano..?

Nanotechnologies







& Nanotechnologies

Approche top down 5/5

✓5 – nano outils pour la biologie moléculaire et culture cellulaire

✓Le développement d'outils pour la biologie moléculaire avec objectif la nanoséparation et la quantification ultime (le génome d'une cellule par exemple)

- ✓ Nanobioreacteur : production de nouvelles molécules
- ✓ Nano-outils enzymatiques pour le fractionnement ultime

Échéance rapide mais dépendante de la réglementation et de la demande

L'impact des OGM sur la santé

Mr Louis-Marie HOUDEBINE

Directeur de recherche, INRA de Jouy en Josas
Expert au comité biotechnologie de l'AFSSA et à l'Agence européenne de la sécurité des aliments

e-mail : louis.houdebine@jouy.inra.fr
Mobile : 06 20 65 93 64

Résumé

L'obtention et l'utilisation d'OGM (organisme génétiquement modifié) pour des applications médicales et alimentaires est une suite logique aux pratiques ancestrales qui consistent à sélectionner via la reproduction les organismes vivants présentant un intérêt pratique pour l'homme. L'approche OGM qui est un complément de la sélection classique permet dans certains cas d'orienter et d'augmenter plus précisément et plus efficacement la biodiversité dans les directions choisies. L'utilisation la plus importante des OGM est la recherche fondamentale. Les OGM sont des outils sans précédent pour étudier les gènes et les maladies humaines ainsi que pour préparer des protéines d'intérêt pharmaceutique. L'approche OGM permet d'obtenir des variétés de plantes et des lignées d'animaux répondant mieux aux exigences des agriculteurs et des consommateurs. L'approche OGM ne comporte dans son principe pas plus d'inconnu et de risque que la sélection classique. Les OGM utilisés pour des applications médicales et alimentaires sont très contrôlés ce qui n'est pas le cas des produits obtenus par sélection. Les OGM de première génération sont essentiellement destinés à améliorer les techniques d'agriculture. Les OGM de deuxième génération seront pour une bonne part destinés à améliorer les qualités nutritionnelles des aliments et leur sécurité.

Introduction

Depuis J. B. Lamarck et C. Darwin nous savons que les êtres vivants sont en perpétuelle évolution et qu'ils sont classables par espèces, variétés, races et lignées tout en étant individuellement tous différents les uns des autres. Ceci a pour conséquence que chacun des nos repas est une expérience unique puisque nos aliments sont toujours différents, consommés pour la première fois et comportant donc une part d'inconnu. On peut considérer que nos ancêtres n'ont pris conscience de la transmission des caractères génétiques et de l'évolution des individus qu'à partir du moment où ils ont domestiqué certaines espèces jusqu'à contrôler leur reproduction et procéder ainsi à une sélection. Cette sélection repose sur un croisement préférentiel des individus présentant des caractères intéressants, suivi d'une élimination des descendants ne répondant pas aux besoins de l'homme. Cette méthode est toujours en vigueur y compris pour les OGM. Ceci repose sur la constatation que le vivant est trop complexe pour être aussi prévisible qu'une éclipse et que, dans ce domaine, l'empirisme ainsi que les enseignements que nous apportent les pratiques ancestrales jouent un très grand rôle.

En 10.000 ans, l'homme a ainsi procédé à des modifications génétiques importantes de la centaine d'espèces qui constituent actuellement l'essentiel de notre nourriture, de nos animaux et de nos plantes ornementales. Ces modifications empiriques sont parfois si profondes que certaines plantes, comme les carottes, ou certains animaux, comme le vers à soie, sont devenus incapables de survivre sans l'assistance de l'homme. Certaines plantes ne sont de plus que marginalement capables de se croiser avec leurs homologues sauvages ou comme le maïs sont adaptées à des climats sous lesquels leurs homologues sauvages ne peuvent vivre. Certaines variétés de plantes ou races d'animaux ont au passage perdu une partie de leur résistance naturelle à des maladies, ce qui impose de procéder à des traitements de ces organismes. Malgré l'imperfection de la démarche, force est de constater que les sélections opérées par nos ancêtres auront permis à des centaines de millions d'êtres humains de se procurer de la nourriture.

A la suite des découvertes de lois de l'évolution et de l'hérédité, la sélection a pu devenir plus précise et performante tout en ne reposant que sur le repérage plus ou moins fin des mutations intéressantes apparues au cours des générations et dans tous les cas avec une faible fréquence ainsi que par le seul fait du hasard. Au cours du XXième siècle, des agents mutagènes (substances chimiques et irradiations) ont commencé à être utilisés pour la recherche fondamentale et pour l'agriculture. Plusieurs milliers de

variétés de plantes ont ainsi été obtenus et croisés avec les variétés existantes pour donner des hybrides en tout genre que l'on retrouve fréquemment sans le savoir dans nos assiettes. Ce procédé ne fait qu'augmenter le nombre de mutants obtenus dans un temps donné et donc offrir un plus grand choix aux sélectionneurs. Cette méthode, qui a une efficacité certaine, est particulièrement peu précise. Les mutagènes altèrent en effet brutalement et de manière totalement aléatoire un nombre inconnu de gènes dont beaucoup n'ont rien à voir avec le caractère recherché. Le tri des individus ainsi obtenus assure généralement une qualité et une sécurité acceptables à la fin du processus. On ne peut que s'étonner qu'un commissaire européen préconise cette méthode de sélection plutôt que l'approche OGM.

Depuis des siècles, l'homme prépare avec bonheur des hybrides intra-spécifiques pour améliorer la production de maïs et de blé par exemple. Beaucoup plus audacieuse est l'obtention d'hybrides inter-spécifiques comme le mulet. Cette opération notoirement inoffensive consiste à transférer en aveugle les 25.000 gènes de l'âne dans le cheval ou l'inverse. Plus audacieuse encore est la création des deux nouvelles espèces de plantes. L'une d'elle est le triticale qui est un hybride résultant du croisement forcé du blé et du seigle. L'hybride primaire étant instable, il a fallu procéder à une cassure aléatoire des chromosomes de l'hybride par irradiation jusqu'à ce que certains individus stables, possédant des chromosomes réarrangés au hasard et contenant l'essentiel du matériel génétique des deux plantes d'origine, soient obtenus. Cette nouvelle espèce a été mise en culture pour l'alimentation animale il y a plusieurs décennies sans autre forme de procès et sans problème agronomique ou alimentaire. Plus banalement, il faut savoir qu'une proportion non négligeable des tomates que nous consommons contient des fragments de chromosomes donc des centaines voire des milliers de gènes provenant d'autres plantes dont quelques uns apportent à la tomate des caractères intéressants comme la résistance à des maladies et les autres sont inconnus. La nature de son côté ne se prive de rien. Il suffit pour s'en convaincre de se rappeler que les mitonchondries et les chloroplastes sont des bactéries qui se sont implantées dans les cellules des organismes supérieurs que le colza provient d'un croisement naturel de deux plantes et le blé d'un croisement de trois plantes.

Cette longue histoire nous conforte dans l'idée que le vivant est décidément très malléable. Il se prête à de nombreuses modifications génétiques qui n'ont rien de naturelles sans provoquer de fréquentes catastrophes. L'approche OGM consiste logiquement à procéder à des mutations de manière connue et dirigée. Il s'agit dans ce cas de transférer un gène connu, dont les effets essentiels sont connus, dans une plante connue pour en améliorer les propriétés. Les variétés de maïs résistantes à la pyrale résulte ainsi du transfert d'un gène de la bactérie *Bacillus thurengiensis* (d'où le nom maïs Bt) capable de lui conférer la résistance à l'insecte. Cette nouvelle approche est donc mieux contrôlée que la sélection classique et elle permet d'utiliser des gènes provenant d'espèces sans devoir transférer en même temps une kyrielle de gènes inconnus.

Un point important est celui de savoir si l'approche OGM est théoriquement globalement meilleure que la sélection classique. Les deux méthodes ne sont en rien exclusives mais au contraire remarquablement complémentaires et pour plusieurs raisons. La sélection classique consiste à transmettre préférentiellement un gène ou des gènes inconnus dont les effets sont globalement bénéfiques. La reproduction sexuée permet cette sélection mais elle s'accompagne inévitablement de la co-sélection des gènes voisins sur les chromosomes qui sont tout aussi inconnus que les gènes d'intérêt et exerçant potentiellement des effets néfastes. Ainsi a-t-on, deux fois indépendamment au moins, obtenu par la sélection classique des variétés de pommes de terre mortellement toxiques pour l'homme. Des gènes impliqués dans la synthèse de toxines naturellement présentes en faible quantité se sont retrouvés co-sélectionnés en même temps que le gène bénéfique à l'insu du sélectionneur.

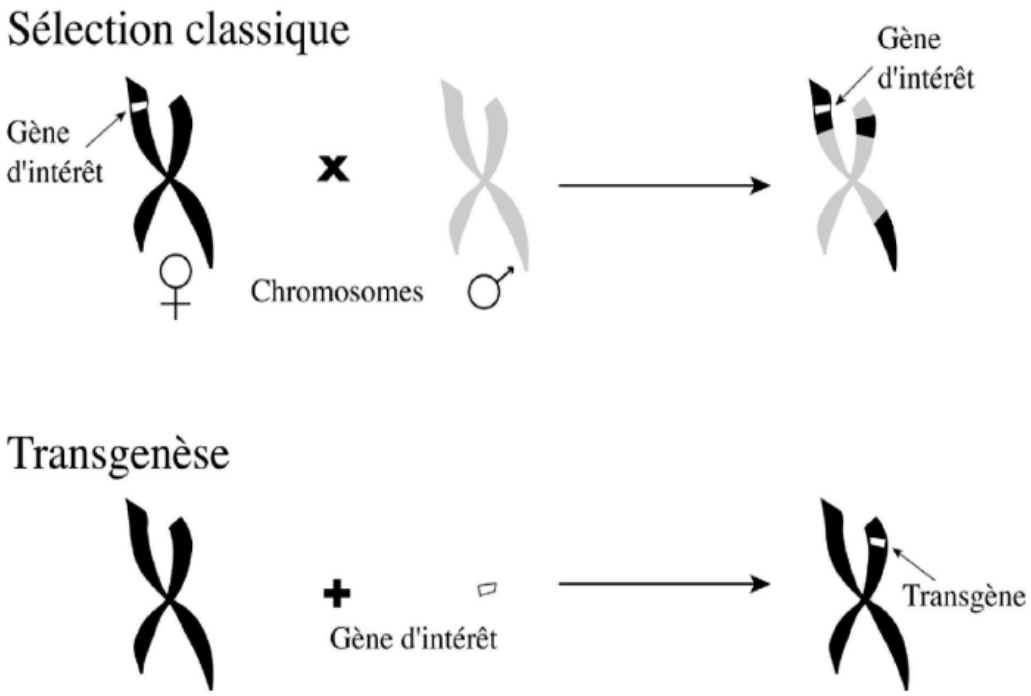


Figure 1. Comparaison des modifications génétiques obtenues par la sélection classique ou par l'approche OGM.

Ce type d'effet secondaire est inhérent à la sélection basée sur la reproduction sexuée qui implique un réarrangement aléatoire des chromosomes homologues au cours de la formation des gamètes.

L'approche OGM ne concerne qu'un gène étranger qui devient un transgène n'interférant souvent pas avec la plante. La transgénèse est donc un excellent outil lorsque le gène responsable du caractère souhaité est connu et donc transférable. C'est le cas pour les gènes Bt de résistance aux insectes. Contrairement à ce qui est souvent affirmé, l'approche OGM peut parfaitement convenir pour modifier une fonction complexe chez une plante ou un animal. La croissance dépend notoirement de plusieurs dizaines voire de centaines de gènes. Le fonctionnement de l'un d'entre eux, celui de l'hormone de croissance est limitant chez certaines espèces comme la souris ou certains poissons. Dans ces conditions, le transfert d'un gène supplémentaire d'hormone de croissance se traduit par une importante augmentation de la taille des animaux. Dans beaucoup de cas, le caractère que l'on souhaite favoriser est complexe et multifactoriel. L'augmentation de la production de lait fait ainsi intervenir de multiple gènes et pour être satisfaisante, elle ne doit pas s'accompagner d'une modification de la composition du lait ni d'une diminution de la fécondité des femelles. Une co-sélection simultanée et optimum de tous ces facteurs n'est alors possible que via la sélection classique avec les risques que cela comporte. Toute variété OGM est par ailleurs croisée avec les variétés conventionnelles pour leur apporter l'amélioration génétique provenant du transgène.

Pour conclure, on peut considérer que la sélection classique et l'approche OGM comportent toutes les deux des inconnus qui ne sont pas tout à fait les mêmes. Les risques engendrés fondamentalement par ces deux méthodes sont en théorie faibles et d'un niveau comparable. Les problèmes peuvent donc provenir au cas par cas des gènes utilisés mais aussi des plantes mises en jeu qui ont ou non des capacités à se disséminer de manière incontrôlée.

Les techniques de transfert de gènes

Les gènes ne se transmettent que très peu spontanément d'un individu à un autre en dehors de la reproduction et des infections virales et encore moins d'une espèce à une autre. Diverses méthodes ont été mises au point au début des années 80 pour transférer des gènes étrangers chez les plantes et les animaux, et perfectionnées depuis. En pratique, les OGM alimentaires résultent de transfert de gènes dont le processus n'est pas totalement contrôlé dans la mesure où l'intégration des gènes est plus ou moins aléatoire. Il n'est pas encore possible de cibler en routine et à un coût acceptable l'intégration d'un gène étranger. Il est par contre tout à fait possible de connaître a posteriori le site d'intégration du gène et de vérifier son intégrité ainsi que celle du site d'intégration du transgène. Les méthodes de transfert de gène ont par ailleurs une efficacité relativement limitée. Des dizaines voire des centaines de lignées de transgéniques sont dont préparées et seules quelques unes ne présentant aucun défaut décelable sont conservées pour être exploitées.

Le gène qui est transféré est rarement sous sa forme native qui se trouve dans un des chromosomes de l'organisme donneur. Un gène Bt de bactérie doit être adapté pour pouvoir fonctionner de manière optimum dans une plante. Le gène dans sa version finale est de plus en plus souvent obtenu par synthèse chimique tout en conservant sa capacité à diriger la synthèse de la protéine porteuse du caractère d'intérêt que l'on souhaite exploiter. Le transgène n'a donc rien d'une partie d'une bactérie ou d'un animal. Un gène est une information génétique codée donnant naissance à une protéine et le transfert d'un gène d'une espèce dans une autre ne doit pas être assimilé à un croisement des deux espèces en question.

Le transgène peut aisément être détecté ce qui permet d'identifier un OGM. La méthode utilisée, la PCR, repose sur une amplification sélective, jusqu'à un million de fois, de la séquence en question. La détection de la protéine codée par le transgène est plus difficile car elle ne peut pas s'appuyer sur une amplification.

Les applications des OGM

L'addition ou l'inactivation d'un gène dans un animal ou une plante est un des moyens essentiels pour déterminer la fonction de ce gène et en particulier son éventuelle implication dans une maladie humaine. Les OGM sont donc depuis le début utilisés très majoritairement par les biologistes pour des études fondamentales.

Il est en principe possible d'adapter les organes de porc pour qu'ils puissent être transplantés à des receveurs humains sans être puissamment rejetés. Des progrès dans ce sens sont encourageants mais la mise en oeuvre de ces outils reste incertaine.

Le lait ou le blanc d'œuf d'animaux portant un gène codant pour une protéine d'intérêt pharmaceutique peuvent être une source abondante et peu coûteuse de ce nouveau type de médicaments. Les protéines candidates sont de types très variés pouvant être des facteurs sanguins (facteurs de coagulation, albumine…), des enzymes, des vaccins, des anticorps anti-cancer, des hormones (hormone de croissance, insuline, EPO…), des protéines de structure (collagène, fibrinogène…), des facteurs de croissance, des médiateurs cellulaires etc… Une protéine humaine préparée à partir du lait de chèvres transgéniques a reçu en 2006 l'autorisation de mise sur le marché. Les feuilles ou les graines des plantes peuvent être utilisées dans le même but mais avec quelques restrictions. Certaines protéines ne sont pas synthétisées sous une forme satisfaisante par les cellules végétales, elles ne sont en particulier pas convenablement glycosylées.

Les protéines extraites des feuilles sont parfois difficiles à purifier à un niveau requis pour des applications thérapeutiques. Certaines plantes cultivées en plein champ peuvent laisser échapper de petites quantités des protéines qui pourraient induire une réaction immunitaire chez les personnes se trouvant à leur contact et provoquer chez eux des réactions auto-immunes. Une possibilité en cours d'étude serait d'utiliser des algues microscopiques qui peuvent être cultivées en toute sécurité dans des bassins confinés.

Une série de projets en cours a pour but d'obtenir des lignées d'animaux de ferme génétiquement améliorés. Aucun de ces projets n'a encore reçu une autorisation pour l'élevage et la mise sur le marché des animaux. Le projet le plus avancé est celui concernant des saumons à croissance accélérée. Ces animaux sont intéressants d'un point de vue commercial et environnemental dans la mesure où ils consomment moins de nourriture. Leur élevage commercial reste non autorisé et il le restera tant que les aquaculteurs n'auront pas donné la preuve qu'ils ont trouvé des moyens pour empêcher l'évasion incontrôlée des saumons dans la mer. Il est probable qu'un tel événement n'aurait pas d'impact négatif significatif mais ceci ne peut être prouvé formellement à l'aide de modèles expérimentaux et, en cas de problème, le mal serait difficilement réversible étant donnés les espaces immenses et incontrôlables que constituent les océans.

Des vaches et des chèvres sécrétant dans leur lait diverses protéines anti bactériennes ou anti virales pourraient protéger les animaux et les consommateurs humains contre ces agents pathogènes. Des vaches, dépourvues du gène PrP et donc insensibles aux prions, ont été obtenues et sont en cours d'étude. Des porcs transgéniques relarguant moins de phosphate polluant sont également disponibles. Des poissons d'élevage résistants à des bactéries sont en cours de validation. Des vaches et des chèvres, dont le lait a été modifié pour diminuer la teneur en lipides et en protéines allergènes indésirables (en particulier la β-lactoglobuline) sont soumises à des examens divers. Il en est de même pour des porcs dont la viande contient des lipides de type oméga-3 au lieu de lipides saturés que l'on sait exercer un effet néfaste sur la santé.

Les projets les plus avancés sont ceux concernant les poissons transgéniques qui devraient être les premiers animaux génétiquement modifiés proposés aux consommateurs. Les projets les plus séduisants sont ceux concernant les maladies des animaux. Des animaux devenus génétiquement résistants à des maladies limiteraient l'usage de substances pharmaceutiques, les pertes inutiles, la souffrance des animaux, les inquiétudes des éleveurs et la transmission de ces maladies à l'homme.

Les applications des OGM alimentaires sont beaucoup plus avancées du côté végétal. Ceci tient au fait que la transgénèse est plus facile à réaliser en masse chez les plantes que chez les animaux. Il est de même plus simple de répandre les transgènes par croisement classique dans les champs que dans les étables. Les plantes OGM actuellement exploitées sont réduites essentiellement au nombre de quatre : le soja résistant à un herbicide, le maïs résistant à des insectes et parfois également à un herbicide, le cotonnier résistant à des insectes et le colza résistant à un herbicide. L'utilisation de ces variétés augmente de 15 % par an et elles sont utilisées presque à égalité dans les pays développés et les pays pauvres. Les surfaces où sont cultivés des OGM représentent l'équivalent de la surface des terres cultivables des USA. Ce succès provient du fait que les agriculteurs voient dans ces semences le moyen d'augmenter leur revenu, de diminuer leur intoxication par les pesticides et de simplifier leur tâche. Les OGM de première génération ont en effet été conçus pour les agriculteurs et non pour les consommateurs, ce qui n'est en rien choquant.

Les OGM de deuxième génération dont le développement a commencé sont plus destinés aux consommateurs. Du riz contenant des quantités très substantielles de vitamine A est en cours de développement et il pourrait être très bénéfique pour les 400 millions d'êtres humains qui souffrent de carence permanente ou chronique en cette

vitamine, rendant aveugle 500.000 enfants par an et causant la mort de 3.000 de ces enfants par jour. Plusieurs autres plantes, des tomates, des pommes de terre et des choux fleurs transgéniques, contenant également des quantités très substantielles de vitamine A, pourraient apporter une contribution très significative pour lutter contre les carences en question. Dans le même ordre d'idée, une variété de cotonnier ne contenant plus une des ses toxines, le gossipol, peut maintenant être consommé par l'homme et il pourrait apporter un supplément de protéines très attendu à 500.000 millions de personnes dans le monde. Les pommes de terre résistantes à un ver nématode pourraient permettre à de nombreux Boliviens d'échapper à une pénurie de nourriture certaines années. Les pays développés devraient également profiter des OGM de deuxième génération. Certains de ces OGM contiennent des lipides oméga-3 en plus grande quantité, des antioxydants, du fer, diverses vitamines, des substances améliorant le goût des aliments, moins d'allergènes etc... L'amélioration des propriétés agronomiques des plantes reste de toute première importance. Des projets très prometteurs visant à obtenir des variétés résistantes à divers stress (sécheresse, courant d'air, sols acides ou trop chargés en sel) et dont les résultats sont très attendus, sont en cours d'étude. Les OGM destinés à la moléculture sont également l'objet d'études spécifiques. Il s'agit de la préparation massive de molécules d'intérêt industriel dont l'exemple les plus visibles concerne les biocarburants. Une application encore très mineure est ce que l'on nomme la phytoremédiation. Il s'agit de plantes capables de détoxifier des sols naturellement contaminés par des substances toxiques ou pollués à la suite d'activités industrielles.

L'impact des OGM sur la santé

En permettant d'apporter de la nourriture à ceux qui en manquent, le OGM vont contribuer directement à améliorer la santé des certaines communautés humaines. Les OGM enrichis en nutriments comme la vitamine A devraient eux aussi avoir une part significative dans l'amélioration de la santé d'un nombre important d'êtres humains. La possibilité de créer des modèles pour l'étude de maladies humaines ou animales ainsi que celle qui consiste à préparer des protéines médicaments vont dans le même sens.

Les OGM peuvent aussi avoir des effets indésirables sur la santé humaine. Toute modification génétique réalisée par quelque méthode que ce soit peut provoquer de tels effets. Cette éventualité a été prise en compte dès le début de l'aventure il y a 25 ans. Une série de mesures est appliquée aux OGM avant qu'ils n'arrivent dans nos assiettes (Figure 2).

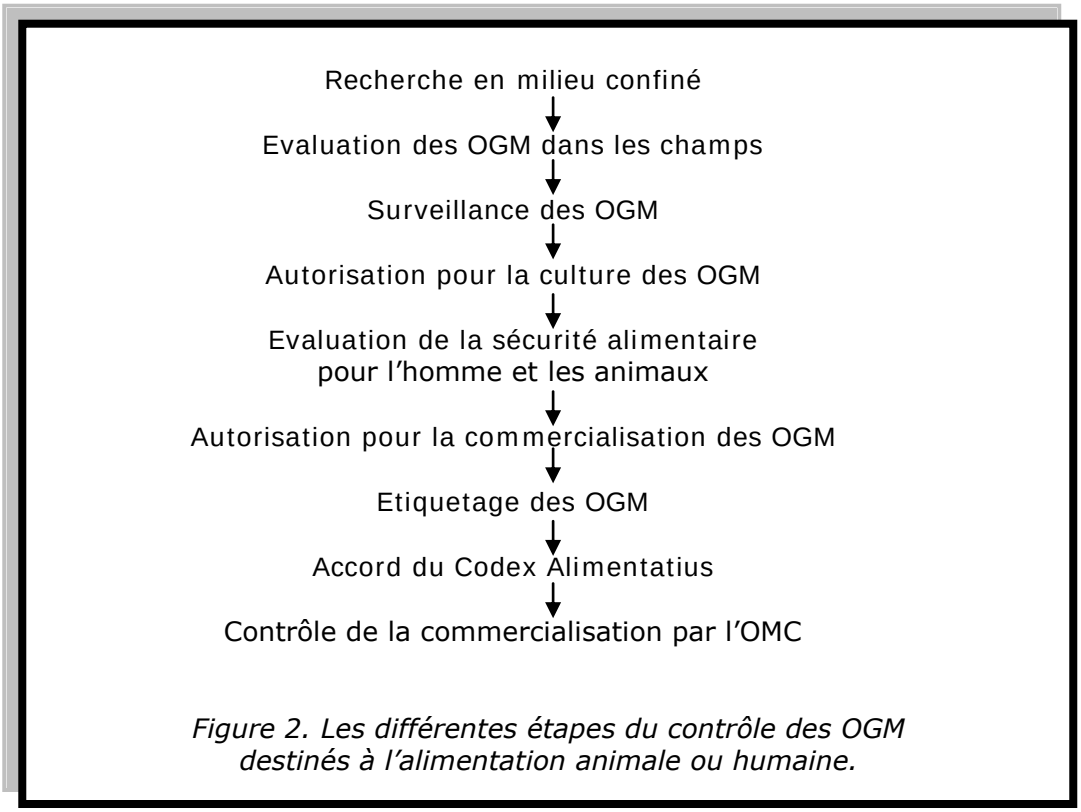


Figure 2. Les différentes étapes du contrôle des OGM destinés à l'alimentation animale ou humaine.

Tout OGM est d'abord obtenu et manipulé dans des milieux confinés. Chaque projet est soumis à une commission (en France depuis 25 ans la Commission de Génie Génétique) qui définit au cas par cas dans quelles conditions de confinent un OGM doit être manipulé. Les dispositifs vont de l'équipement d'une cuisine pour les OGM de classe de risque 1 à de véritables bunkers pour ceux très rares qui sont de classe 4.

La dissémination volontaire d'un OGM pour des essais en milieu ouvert est contrôlée actuellement par la Commission de Génie Biomoléculaire. Un tel OGM candidat à la dissémination doit être de classe de risque 1. Ces mesures sont efficaces puisqu'on ne dénote aucune dissémination intempestive d'OGM à partir des essais en champs ni d'accidents dans les milieux confinés.

L'évaluation des risques de la consommation d'un OGM est faite en France par l'AFSSA (Agence Française de Santé et de Sécurité Alimentaire) et au niveau européen par l'AESA. Seuls les avis de cette agence, qui tient compte des évaluations des agences nationales, sont transmis à la Commission Européenne qui doit prendre la décision d'autoriser ou non la culture en masse et la mise sur le marché d'un OGM destiné à la consommation humaine ou animale.

Les critères retenus pour considérer qu'un OGM ne comporte pas de risque alimentaire nouveau reposent sur plusieurs principes. Les organismes vivants sont résolument trop complexes pour qu'il soit possible de prévoir la totalité de leurs propriétés. Les risques peuvent venir du transgène lui-même ou plus exactement de la protéine dont la synthèse est définie par le transgène. D'autres risques peuvent résulter d'interactions du transgène et de la protéine correspondante avec l'OGM. Un principe déjà émis par Aristote veut qu'il soit possible de démontrer l'existence d'un risque mais non l'absence de risque. Personne n'a pu démontrer strictement l'innocuité des carottes ou du maïs. On sait seulement par l'usage que l'on ne peut pas corréler la consommation de carottes ou de maïs avec la survenue de maladies particulières. Les tests procèdent

donc par comparaison avec les plantes ou les animaux de référence qui ont servi à préparer les OGM.

Les tests qui sont exigés sont les suivants :

1) description des propriétés agronomiques de la plante avant et après la modification génétique,
2) description détaillée du gène avant et après son transfert dans la plante ou l'animal,
3) évaluation de l'équivalence en substance (protéines, lipides, ions, vitamines, métabolites, toxines naturelles, etc…) entre l'OGM et la plante de référence,
4) évaluation de la toxicité aigüe de la protéine pure codée par le transgène et donnée en excès à des souris par gavage,
5) évaluation de la toxicité chronique de l'OGM donné à des rats pendant 90 jours,
6) examen des tissus et des paramètres sanguins des rats et des témoins à la fin du traitement,
7) évaluation de l'alimentarité de l'OGM en alimentant des animaux cibles dans les conditions d'élevage,
8) évaluation des propriétés allergènes de la protéine provenant du transgène et de l'OGM.

Ces tests sont considérés par les toxicologues comme aptes à révéler l'existence de problèmes qui alors doivent être examinés par des tests plus approfondis. Si rien n'est différent entre l'OGM et l'organisme de référence, les conclusions des experts est que l'OGM comporte le même niveau de risque que le contrôle. En pratique, presque un dossier sur deux provenant des industriels est rejeté en première instance par les commissions non parce que l'OGM parait dangereux mais parce que les informations le concernant sont incomplètes. Un dossier n'est pas accepté tant que ces informations n'ont pas été fournies. Aucun des OGM mis dans le commerce n'a pas satisfait à ces exigences et aucun n'a posé de problème pour les animaux qui sont les seuls consommateurs réels d'OGM, bien que des centaines de millions d'animaux d'élevage consomment des OGM depuis 10 ans. Ceci n'est pas réellement surprenant d'un point de vue théorique. Il est en effet difficile d'imaginer qu'un maïs Bt soit toxique alors qu'aucun maïs ne l'est et que les toxines Bt ne le sont pas non plus. On voit mal par ailleurs comment un semencier proposerait aux experts des variétés pour lesquels les tests d'innocuité étaient douteux. De telles variétés sont éliminées au cours du processus de validation selon le principe appliqué depuis des millénaires pour la sélection classique. Notons au passage que les OGM sont soumis à des tests rigoureux et, selon certains toxicologues professionnels, probablement excessifs, alors que les variétés obtenues par sélection classique ne sont que très superficiellement contrôlées.

Une question régulièrement posée par les consommateurs est celle de connaitre les risques engendrés par la consommation des produits issus d'animaux ayant été alimentés par des OGM. Ces risques sont a priori nuls car la digestion dégrade la plupart des substances que nous ingérons et a fortiori une double digestion. Il a été très bien démontré que le lait et la viande des animaux nourris par des OGM ne contiennent pas de trace du transgène ni de la protéine correspondante.

L'impact des OGM sur l'environnement

Cette question importante n'a pas véritablement de sens comme toutes celles qui font référence globale aux OGM. Il n'est pas plus judicieux de considérer que les OGM sont dangereux ou non pour les consommateurs ou l'environnement que de considérer que les plantes en général le sont. Chaque OGM comme chaque variété de plantes est différent des autres et les tests tiennent compte de cette réalité.

Les maïs Bt diminuent un peu les épandages de pesticides chimiques mais ce qui est plus important c'est que la toxine Bt est une protéine qui n'est active que chez un nombre très restreint d'espèces d'insectes. Cette protéine est instable, très rapidement digérée par les consommateurs et dégradée dans le sol en quelques semaines. Les toxines Bt sont moins d'effets nocifs sur l'environnement que les pesticides chimiques. Les cultivateurs de maïs Bt sont heureux de constater le retour des coccinelles et autres insectes non nuisibles dans leurs champs. Il doit être mentionné également que les maïs Bt contiennent souvent nettement moins de mycotoxines cancérigènes et en particulier de fumonisine que les maïs conventionnels qui eux-mêmes en contiennent moins que les maïs issus de l'agriculture biologique. Ceci vient du fait que les maïs Bt sont particulièrement en bonne santé ce qui permet moins aux champignons microscopiques de les infecter et de les contaminer par des mycotoxines dangereuses. L'émergence de pyrales résistantes aux toxines Bt n'a pas eu lieu jusqu'à maintenant grâce à l'utilisation de zones refuges qui sont des champs dans lesquels est cultivé du maïs conventionnel qui permet aux pyrales sensibles à la toxine Bt de se multiplier et de se répandre dans les champs d'OGM. La dissémination du maïs n'est pas un problème crucial et la dissémination des maïs OGM ne l'est donc pas. Les agriculteurs savent parfaitement cultiver dans la même exploitation du maïs grain pour les animaux et du maïs doux pour l'homme sans que les deux variétés très facilement identifiables se mélangent. Il en est de même pour la cohabitation entre les maïs conventionnel et OGM. De nombreux travaux financés par l'UE ont établis ces faits sans ambiguïté depuis plusieurs années déjà. La réglementation européenne considérant qu'un OGM accepté pour une consommation à l'état pur et présent à l'état de traces (inférieures à 0,9 %) ne comporte pas de risque pour le consommateur est raisonnable. Ceux qui clament le contraire prennent les OGM comme prétexte pour d'autres causes ou cherchent à préserver artificiellement leurs marchés, en particulier ceux des produits issus de l'agriculture biologique. Le règlement concernant l'étiquetage avec le seuil de 0,9 % déterminant si la mention « OGM » doit figurer ou non sur le produit repose donc sur des bases rationnelles apportant des garanties élevées de sécurité.

Le soja résistant à l'herbicide Roundup permet de réduire le nombre d'épandages d'herbicides et il évite surtout d'utiliser des herbicides plus toxiques que le Roundup. Il est important de rappeler que l'utilisation des OGM n'a pas créé le problème du désherbage au moyen d'herbicides mais y a au contraire apporté une nouvelle solution. Le succès du soja résistant au Roundup vient du fait que l'épandage de l'herbicide se fait dans le meilleur des cas une seule fois au début du développement du soja. Celui-ci couvre rapidement le sol empêchant la croissance des herbes indésirables. Par ailleurs, le Roundup élimine toutes les plantes, y compris *Datura ferox* (en particulier en Argentine) dont les graines qui contiennent des toxines ne doivent plus être éliminées des récoltes puisqu'elles ne s'y trouvent plus. L'émergence d'herbes sauvages résistantes au Roundup est possible et elle a commencé dans certaines régions des USA. Ce problème agronomique doit être traité à temps pour éviter de perdre le contrôle de la situation.

Le cotonnier Bt permet de réduire très notablement les épandages de pesticides particulièrement toxiques pour les agriculteurs et l'environnement. Il permet une augmentation des rendements et ceci explique son succès dans les pays riches ou pauvres concernés.

Le colza résistant à des herbicides est cultivé essentiellement au Canada où le climat ne se prête pas à la dissémination incontrôlée de ces variétés. En Europe, ces colzas OGM ne sont pas autorisés car leur dissémination est possible en raison de la persistance des graines dans le sol pendant des années mais également parce que le colza peut se croiser avec des plantes sauvages.

Une question importante à préciser est celle de savoir si les OGM actuels et futurs ont un impact positif ou négatif sur la santé des consommateurs d'une part et des

utilisateurs d'autre part. Une des conclusions d'un rapport publié par l'AFSSA en 2004 est que le consommateur ne bénéficie probablement pas de la diminution de l'utilisation de certains pesticides chimiques que permettent les OGM, car la quantité de résidus présents dans les aliments est très déjà en dessous des doses nocives dans les produits conventionnels. Une conclusion similaire a été formulée pour les produits issus de l'agriculture biologique (AFSSA, 2003). L'allergénicité des OGM n'est par ailleurs qu'une menace théorique qui doit certes être soigneusement évaluée au cas par cas.

Deux rapports de l'Académie de Médecine, de l'Académie d'Agriculture et du Centre international de recherche sur le cancer de Lyon ont tiré un certains nombre de conclusions sur l'impact de l'environnement sur la santé humaine. Les polluants dans leur globalité ne sont pas à l'origine de plus de 0,1 % des cancers. La très grande majorité des pesticides autorisés actuellement n'a pas d'effets toxiques ou cancérigènes aux concentrations présentes dans l'environnement. Un pesticide n'est accepté dans l'UE que s'il est dégradé à un taux de 90 % au moins en un an.

Contrairement à ce que l'on pense souvent, l'usage des pesticides dans les pays développés va en décroissant et les molécules utilisées sont de moins en moins nocives pour l'homme et l'environnement. La quantité de pesticides répandus en France est en effet passée de 120.500 à 71.600 tonnes entre 1999 et 2006. Le nombre de substances pesticides utilisées dans l'UE était il y a quelques années de 984 dont 611 ont été interdites avec pour objectif de n'en conserver que 250 en 2010. Parmi les 53 substances préoccupantes, 30 seront éliminées en 2008.

L'agriculture biologique n'apporte pas de preuve qu'elle réduit les risques pour les agriculteurs, les consommateurs et l'environnement. Une étude a ainsi montré en 1998 que la protection biologique avait nécessité 14 fois plus de matières actives que les méthodes conventionnelles appliquées de manière raisonnée. Ceci impliquait 23 passages de pulvérisateur au lieu de 12. Les pesticides sont donc un mal avec lequel il nous faut apprendre à vivre en acceptant les risques les plus faibles possibles. Les actions engagées depuis des années vont dans ce sens et le programme REACH de l'UE ne peut que renforcer cette tendance. Pour conclure, les académiciens notent qu'une bonne utilisation des pesticides nécessite une formation professionnelle renforcée des utilisateurs. Une mention spéciale peut être faite au sujet du Roundup qui est l'herbicide auquel sont résistants les OGM concernés. Cet herbicide est particulièrement peu toxique, non cancérigène et biodégradable.

Conclusion

La culture des OGM est actuellement restreinte à quelques plantes de grande culture. La stratégie initiales des industriels a clairement consisté à choisir des projets qui ne modifiaient pas les propriétés nutritionnelles des plantes mais qui étaient susceptibles de séduire les agriculteurs en simplifiant leur tâche, en augmentant leurs revenus et en abaissant leur exposition aux pesticides toxiques. Force est de constater que la première manche du pari est gagnée.

Le succès des OGM après seulement 12 ans de commercialisation est sans précédent dans l'histoire des semences. Le fait que la réduction de l'utilisation des pesticides n'était pas le but premier de cette aventure et qu'elle soit devenue rapidement une réalité est particulièrement remarquable. Des projets en cours, nombreux et séduisants, offrent de multiples possibilités de lutter contre les maladies des plantes et il est peu douteux que ces résultats vont se traduire prochainement par la mise sur le marché de nouvelles variétés ne nécessitant plus autant de pesticides. Les agriculteurs ont donc plutôt plus à gagner qu'à perdre en adoptant les OGM. Ceci est vrai du point de vue financier puisque les cultivateurs français de maïs considèrent que la culture du maïs

Mon 810 leur procure un supplément de bénéfice de 100 € par hectare. Ceci n'est bien entendu vrai que lorsque les attaques par les pyrales sont un problème important. Il n'y a aucune raison de penser que les OGM actuellement autorisés pour la culture et la consommation comportent des risques pour la santé y compris pour les agriculteurs. L'utilisation de certains OGM actuels permet une réduction significative des épandages de pesticides. Certains des OGM en cours de développement vont plus loin dans ce sens. Une partie des OGM de deuxième génération se propose d'améliorer les propriétés nutritionnelles des plantes. Ceci peut s'accompagner d'une modification de certaines voies métaboliques conduisant à une accumulation indésirable de certains métabolites. L'exemple de l'accumulation de toxines (les solanines) dans certaines variétés de pommes de terre obtenues après sélection classique est éloquent à cet égard.

Un autre point devra être pris en considération. Les bienfaits récemment découverts des lipides de types oméga-3 poussent les industries agroalimentaires à ajouter ces molécules dans les aliments par les moyens dont ils disposent. Il existe des porcs transgéniques dont les graisses sont enrichies en lipides oméga-3 et de même des souris expérimentales dont le lait contient d'avantage de ces mêmes lipides. Les consommateurs vont donc se voir proposer de plus en plus souvent des alicaments dont ils pourraient faire un usage abusif sans même s'en douter. Une partie essentielle des problèmes alimentaires dans les pays riches vient non pas tant de la qualité des produits mais de la manière dont ils sont consommés. Les consommateurs devront donc être informés du fait que certains OGM alicaments doivent être utilisés avec modération et en fonction du régime global de chacun.

La culture des OGM est une réalité qu'il serait vain et qu'il est risqué de nier. L'Europe qui est une grande puissance agricole est dans ce domaine sur le chemin de la marginalisation voire de l'élimination. Sa recherche académique et industrielle dans ce secteur est dans un état de coma dépassé. Le fait est d'autant plus paradoxal que l'UE s'est dotée des meilleures réglementations et qu'elles sont effectivement appliquées. Il est difficilement compréhensible que les OGM soient inutiles comme certains le clament, quand on voit les bienfaits qu'a apportés la sélection génétique. L'obtention d'OGM n'est en effet qu'une autre manière de faire de la sélection génétique. L'UE fidèle à ses convictions ferait mieux de se donner les moyens de créer et d'exploiter les OGM qu'elle juge utiles pour elle-même et les pays pauvres plutôt que de renforcer de facto le monopole de quelques industriels. Il est frappant dans cette affaire de constater que l'avis des utilisateurs principaux, les agriculteurs, est peu pris en compte. Les consommateurs quant à eux ont une image complètement fausse des enjeux des OGM. Certains observateurs prévoient un scénario catastrophique pour l'Europe. Le refus des OGM ou simplement la lenteur des prises de décisions les concernant fait planer la menace d'une pénurie de nourriture pour les animaux d'élevage européens, qui se traduirait par l'obligation d'éliminer une bonne partie de ces animaux et d'importer la viande d'animaux nourris à l'étranger avec les OGM rejetés par l'UE. Les OGM posent des problèmes socio-économiques comme la plupart ces nouvelles techniques. Ce fait est particulièrement important dans le cas des OGM dans la mesure où il s'agit de l'alimentation humaine. Une vigilance soutenue dans ce domaine est totalement justifiée mais il n'y a aucune raison de développer pour cela des argumentations mensongères sur les effets négatifs des OGM sur la santé et l'environnement.

Pour en savoir plus :

* Aumaitre L.A., Les aliments issus des organismes génétiquement modifiés : équivalence, efficacité et sécurité chez les animaux de ferme. INRA Productions Animales (2002) 15 :97-108.

* Kafadaroff G. (2008), Agriculture durable et novelle révolution verte. Edition L'Ecritoire du Publieur.

* Houdebine L.M. (2005), Les applications de la transgénèse animale. Bull.Acad. Vet. France. 158: 487-498.

* OGM et alimentation : peut on identifier et évaluer des bénéfices pour la santé ? (2004) AFSSA, Avis et Rapports, Rapports, Biotechnologies, liste complète.

* Allergies alimentaires : les plantes génétiquement modifiées ont-elles un impact ? (2006) AFSSA, Avis et Rapports, Rapports, Biotechnologies, liste complète.

* Evaluation nutritionnelle et sanitaire des aliments issus de l'agriculture biologique. (2003) AFSSA, Avis et Rapports, Rapports, Biotechnologies, liste complète.

* www.pseudo-sciences.org/ : dossier OGM

* Gallais A., Ricroch A. (2007), Plantes transgéniques : faits et enjeux (Amazon).

* Kuntz M. (2008), Le monde sans Monsanto. AFIS Science

* Houdebine L.M. (2003), OGM le vrai et le faux. Edition Le Pommier.

* Ménara C. (2008), Les variétés de maïs résistantes à la pyrale et l'agriculture durable. intitulé Plantes transgéniques : faits et enjeux (Amazon). AFIS Science, Articles et Dossiers, OGM.

* Bergé J.B., Ricroch A. (2008), Analyse de l'avis sur la dissémination du MON 810 sur le territoire français du comité de préfiguration d'une haute autorité sur les organismes génétiquement modifiés. AFIS Science, Articles et Dossiers, OGM.

* Mitchell P., 2007, Europe's anti-GM stance to presage animal feed shortage? Nature Biotechnol. 25, 1065-1066.

* Herring R.J. (2008) Opposition to transgenic technologies : ideology, interests and collective action frames. Nat Rev Genet. 9:458-63.

* Les causes du cancer en France. (2007) Rapport l'Académie des sciences, l'Académie de médecine et le Centre international de recherche sur le cancer de Lyon.

* Pesticides, OGM, agriculture biologique et santé. (2008) Rapport de l'Académie d'Agriculture et de l'Académie de Médecine.

* Williams G., Kroes R., Munro I., Safety evaluation and risk assessment of herbicide roundup and its active ingredient, glyphosate, for humans. Reg Tox Pharm (2000) 31: 117-165.

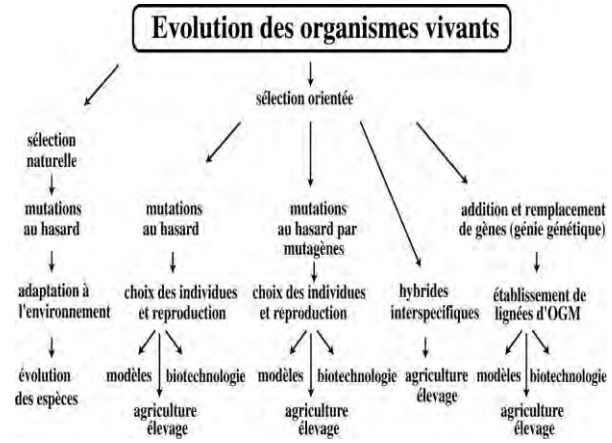
* Ammann K., Effects of biotechnology on biodiversity: herbicide-tolerant and insect resistant GM crops. Trends Biotechnol (2005) 23: 388-394.

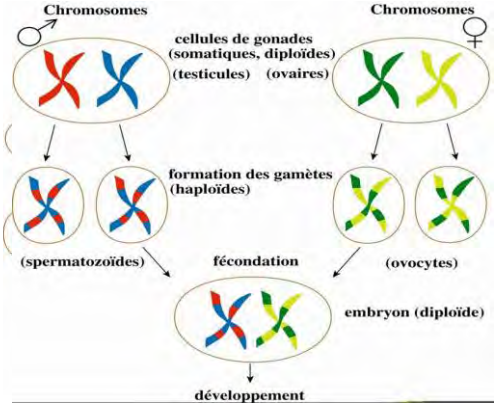
* Peterson RKD, Shama L.M., A comparative assessment of genetically engineered, mutagenic and conventional wheat production systems. Transgenic Res 2005, 14:859-875.

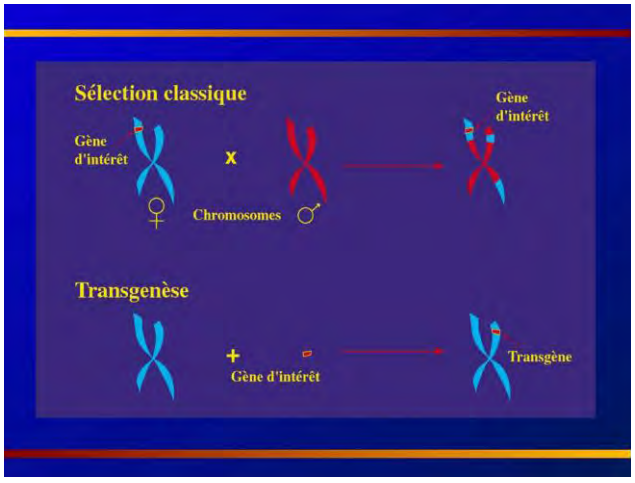
* Houdebine L.M., Les effets sanitaires potentiels des organismes génétiquement modifiés. Environnement, Risques et Santé (2004) 3 :341-352.

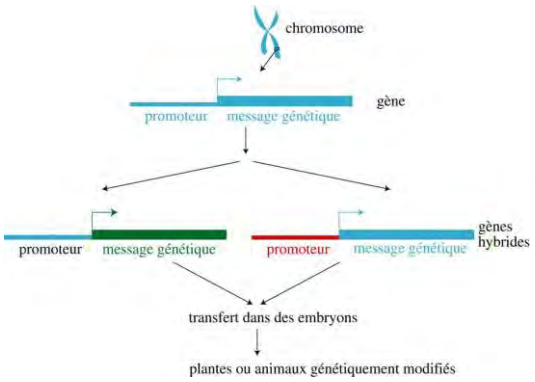
* Hammond B., Lemen. J., Dudek R., Ward D., Jiang C., Nemeth M. and Burns J., Results of a 90-day safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-protected corn. Food and Chemical Toxicology 2006 44 : 147-160.

* Houdebine L.M. (2008), Préparation de protéines thérapeutiques à partir des animaux transgéniques. Sang Thrombose Vaissaux 20 : 1-8.









L'utilisation de la transgénèse chez les animaux

I - Les études fondamentales (étude des mécanismes de contrôle des gènes, étude du rôle des gènes *in vivo*).

II - La création des modèles biologiques pour l'étude de maladies humaines (cancers, athérosclérose, mucoviscidose, sida ...).

III - La préparation des protéines recombinantes (lait, sang, blanc d'oeuf, etc...).

IV - La préparation d'organes pour la transplantation chez l'homme.

V - La lutte contre les maladies : gènes de résistance, vaccination génétique (ARN antisens, ribozymes, anticorps monoclonaux, protéines virales, récepteurs de virus ...).

VI - L'amélioration des caractéristiques génétiques des animaux (croissance, reproduction, qualité de la viande, dépendance vis à vis de la nourriture...).

Obtention d'animaux génétiquement modifiés pour améliorer les productions animales

* Accélération de la croissance des poissons (saumons)
* Résistance aux maladies: pertes réduites, meilleur bien-être animal, moindre utilisation d'antibiotiques, réduction des zoonoses (mammites, cécropine chez les poissons, infections virales, prions PrP)…
* Amélioration de la qualité du lait: moins de lactose et de protéines allergènes, transport de protéines anti-pathogènes (anticorps)
* Amélioration de la qualité de la viande: plus de lipides polyinsaturés de type oméga 3
* Réduction de la pollution: porcs sécrétant de la phytase dans leur salive

1 Utilisation des plantes transgéniques

- Résistance aux maladies	- moins de pesticides - culture simplifiée - rendement augmenté	Exemple : maïs Bt résistant à la pyrale
- Résistance aux herbicides	- moins d'herbicides - culture simplifiée - rendement augmenté	Exemple : soja résistant aux herbicides
- Contrôle de la maturation	- fruits plus sapides - transport facilité - rendement en matière solide augmentée	Exemples : . tomate Savor Flavor . melon . fruit contenant plus de terpenoïdes
- Addition d'alicaments	- lutte contre les carences alimentaires	Exemples : riz doré supplémenté en . Vitamine A . Fer

2 Utilisation des plantes transgéniques

- Adaptation des plantes aux sols	- conquête de nouvelles terres - rendement augmenté - culture simplifiée	Exemples : . plantes poussant sur des sols salé ou alcalin . plantes résistantes à la sècheresse . plantes resistantes au vent . plantes poussant sans apport d'azo
- Détoxification des sols (phytorémédiation)		
- Changement de composition des plantes		Exemple : . protéines riches en acides aminés rares . arbres riches en cellulose et pauvres en lignines . taille des grains d'amidon . tournesol riche en acide oléique
- Préparation de molécules d'intéret pharmaceutique		Exemple : . antigène vaccinant de l'hépatite B . lipase de chien . anticorps
- Préparation de molécules pour l'industrie		Exemples : . huiles (détergents, carburants ...) . précurseurs de plastiques biodégradables . précurseurs pour des molécules d'intéret pharmaceutique

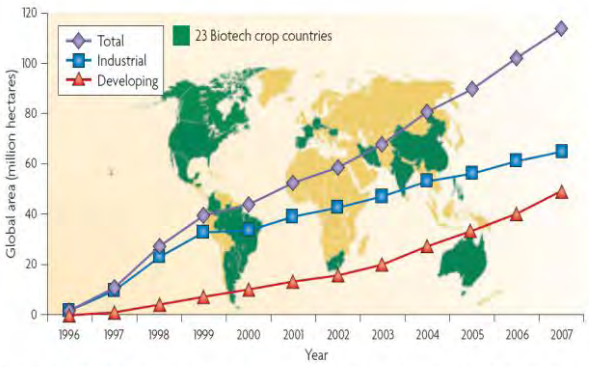
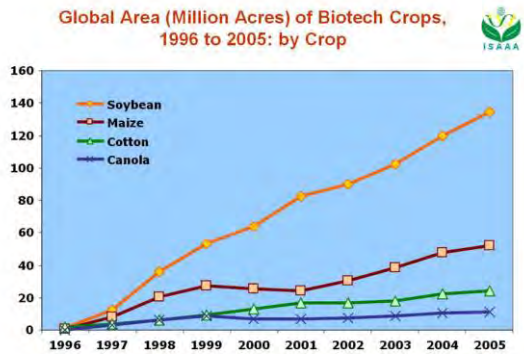
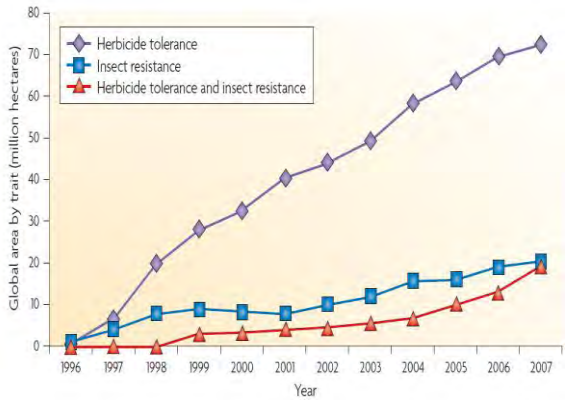


Figure 1 | **Global distribution of transgenic crop production, 1996–2007.** Data for this figure is taken from REF. 82.





Impact économique et environnemental des OGM en 11ans

* Les agriculteurs on augmenté leurs revenus globaux de 6,941 millions de dollars (M$) en 2006 et 33,770 M$ depuis 11 ans, correspondant à 6,4% du revenu provenant de ces plantes.

* Les agriculteurs des pays en développement ont profité un peu plus des OGM en 2006 que les pays développés : 3,713 contre 3,228 M$.

* Les OGM réunis ont permis d'abaisser l'utilisation de pesticides de 285,700 tonnes au cours des 11 années (15,4 % en poids et à 7,9% en matière active des pesticides).

* La diminution des pesticides pendant les 11 ans a été un peu plus élevée dans les pays en développement (52%) que dans les pays développés.

* Les OGM actuels permettent une diminution de l'émission de gaz à effet de serre correspondant à celle de 6,56 millions de voiture (moins d'épandages et moins de labours).

La culture de la papaye à Hawaï

* La culture de la papaye est une des ressources essentielles de Hawaï.
* Un virus a décimé les plantations de papaye et ruiné les agriculteurs.
* Des chercheurs de l'université Cornell (USA) ont obtenu des lignées de papaye exprimant le gène de la capside du virus et devenues résistantes au virus.
- La culture de la papaye redevient florissante à Hawaï
- La papaye non OGM peut être cultivée si elle est entourée de papaye OGM

Le pari du riz doré

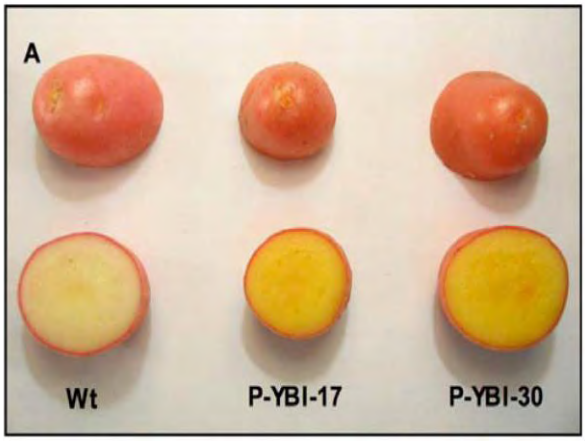
*400 millions personnes souffrent d'un manque vitamine A: 500.000 enfants tombent aveugles par an et 3000 meurent chaque jour

*L'adaptation de l'alimentation et la distribution de vitamine A ne résout pas le problème

*Du riz a été génétiquement modifié par des chercheurs universitaires et par Syngenta pour contenir de la vitamine A

* Le riz est mis gracieusement à la disposition de ceux qui en ont besoin: 70g de riz par jour peut apporter, avec un coût très réduit, 300µg de vitamine A (la moitié de ce que l'on doit absorber quotidiennement)

* Il existe des tomates et des pommes de terre génétiquement modifiées et contenant des quantités de vitamine A aussi élevées que dans le riz



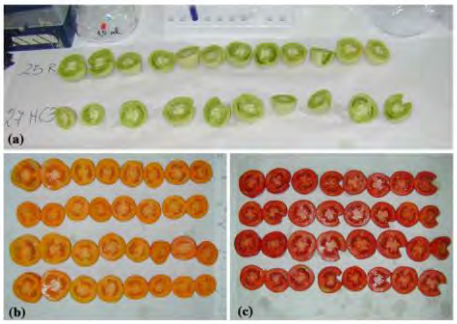
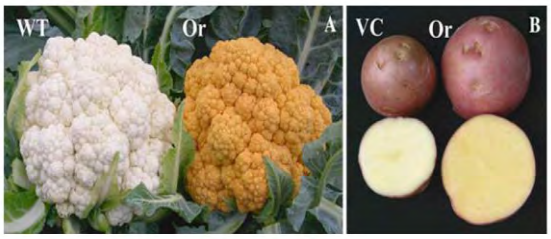


Fig. 2 Fruits of transgenic (HighCaro) and control (Red Setter) lines sampled at the mature green and the ripe stages for the extraction of RNA. **(a)** Fruits at mature green stage from the plots 25 (Red Setter) and 27 (HighCaro). Fruits of HighCaro **(b)** and Red Setter (c) lines at ripe stage sampled from the four replicates



Des pommes de terre pour les Boliviens

* Les boliviens sont de gros consommateurs de pomme de terre qui sont essentielles pour la survie de bons nombre d'entre eux.
* La récolte des pommes de terre en Bolivie est fortement diminuée par l'action de nématodes.
* Des chercheurs de l'université de Leeds (UK) ont obtenus des lignées de pommes de terre transgéniques résistantes aux nématodes et ils ont annoncé que ces lignées seront mises à la disposition des Boliviens.
* Des campagnes vigoureuses cherchent à faire croire, sans preuve, aux Boliviens que les pommes de terre résistantes aux nématodes sont dangereuse pour les consommateurs

Des protéines de coton pour un demi milliard d'hommes

*Le coton est une source de fibres (la fleur), d'huile et de protéines (la graine)

*La graine de coton contient plusieurs toxines dont le gossipol qui empêche sa consommation par l'homme

* Le coton sans gossipol obtenu par sélection est trop sensible aux ravageurs pour être cultivé

*Le coton génétiquement modifié pour empêcher l'accumulation de gossipol dans la graine est normalement sensible aux ravageurs et peut être utilisé comme source de protéines potentiellement par 500.000 millions de personnes

Les OGM de deuxième génération

*Les OGM actuellement exploités ont été conçus pour améliorer les techniques de culture. Ils n'ont qu'un impact négligeable sur les consommateurs.
*Les OGM en préparation ont pour but:
- d'améliorer la composition des aliments: addition de protéines, lipides, vitamines, antioxydants…(alicaments), retrait de toxines, d'allergènes, de caféine…
- d'améliorer le goût des aliments (terpènes)
- de réduire les contaminations par les pesticides et les engrais
- de produire des molécules non alimentaires: biocarburants, amidon riche en amylose, protéines thérapeutiques, métabolites…

Quel est le rôle des experts?

*Qu'est-ce qu'un expert?

*Un expert est une des personnes qui sait le plus de chose sur un sujet donné à un moment donné (ce qui est parfois très peu de chose)

Qu'est-ce qu'un risque?

- Un risque est un danger potentiel. Exemple: naviguer sur la mer comporte un risque bien identifié.
- Un risque potentiel est un risque non clairement identifié. Exemple: l'utilisation des téléphones portables comporte peut-être un risque mais il n'a pas été décrit.

Quel est le risque de consommer des OGM?

- Le risque de consommer des OGM validés par les agences de sécurité n'est qu'un risque potentiel.
- Un OGM considéré comme comportant un risque n'est pas autorisé à être mis sur le marché. Exemples: le soja contenant de l'albumine de la noix du Brésil qui est allergène; le poix résistant aux charançons et qui contient une protéine immunogène

Qu'est-ce que le principe de précaution?

- Le but du principe de précaution est de préserver notre environnement pour ne pas compromettre le vie de nos descendants
- Il s'applique en pratique à des situations comportant des risques potentiels très élevés mais non formellement démontrés. Exemple:l'effet de serre.
- Le principe de précaution ne doit s'appliquer que pendant un temps donné pour des situations potentiellement graves et il doit être accompagné de travaux visant à empêcher l'utilisation d'une technique ou au contraire à lever un moratoire qui n'a plus lieu d'être.

Commission de Génie Génétique (Expériences de laboratoire)

* Classe 1: aucun risque pour l'expérimentateur et l'environnement: pas de confinement
* Classe 2: risque limité: local clos, hotte de type II, destruction des déchets
*Classe 3: risque très élevé: local en dépression, sas, filtres absolus, hotte de type II, vêtements spéciaux, autoclave à double entrée
* Classe 4: risque très élevé: local de classe 3 renforcé, hotte de type III, vêtements pour protection totale

¤ Avis donné par le Ministère de la Recherche

Commission de Génie Biomoléculaire (Dissémination volontaire)

* Réservé aux OGM de classe1
* Description de la plante
* Description du gène
* Description du lieu de culture
* Autorisation de cultiver de petites surfaces

¤ Autorisation donnée par le Ministère de l'Agriculture.

Tests de sécurité alimentaire des OGM

* Description de la plante
* Description du gène dans la plante
* Équivalence en substance
* Toxicité aiguë chez des souris (10 jours)
* Toxicité chez le rat nourri avec l'OGM (3 mois). Examen approfondi des animaux
* Alimentarité chez les animaux cibles
* Allergénicité de l'OGM

¤ Avis donné en France par l'AFSSA et dans l'UE par l'EFSA
¤ Décision prise par la Commmision Européenne/le Conseil des Ministres Européens

Tests alimentaires de PGM de longues durées

Brake, D.G., Evenson, D.P. (2004) A generational study of glyphosate-tolerant soybeans on mouse fetal, postnatal, pubertal and adult testicular development. Food and Chemical Toxicology 42: 29-36. *Soja(herbicide) + souris: 3 générations*

Brake, D.G., Thaler, R., Evenson, D.P. (2004) Evaluation of Bt (Bacillus thuringiensis) corn on mouse testicular development by dual parameter flow cytometry. Journal of Agricultural and Food Chemistry 52: 2097-2102. *Maïs(Bt)+souris:3 générations*

Flachowsky, G., Halle, I., Aulrich, K. (2005) Long term feeding of Bt-corn – a ten-generation study with quails. Archives of Animal Nutrition 59: 449-451. *Maïs (Bt)+cailles: 1 an*

Rhee, G.S., Cho, D.H., Won, Y.H., Seok, J.H., Kim, S.S., Kwack, S.J., Lee, R.D., Chae, S.Y., Kim, J.W., Lee, B.M., Park, K.L., Choi, K.S. (2005) Multigeneration reproductive and developmental toxicity study of bar gene inserted into genetically modified potato on rats. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 68: 2263–2276. *Pommes de terre (herbicide)+rats:5 générations*

Vecchio, L., Cisterna, B., Malatesta, M., Martine, T.E., Biggiogera, M. (2004) Ultrastructural analysis of testes from mice fed on genetically modified soybean. European Journal of Histochemistry 48: 449-454. *Soja(herbicide)+souris: 8mois*

Wainwright, P.E., Huang, Y.-S., DeMichele, S.J., Xing, H.C., Liu, J.-W., Chuang, L.-T., Biederman, J. (2003) Effects of high-γ-linolenic acid canola oil compared with borage oil on reproduction, growth, and brain and behavioral development in mice. Lipids 38: 171-178. *Canola (+ γlinolénique)+ souris: plusieurs générations*

Critères d'acceptation pour une nouvelle variété de plante classsique

* Nouveauté du caractère agronomique
* Stabilité de la variété
* Alimentarité chez les animaux cibles

¤ Avis donné par le GEVES (INRA et Ministère de l'Agriculture)
- Inscription au catalogue des nouvelles semences après 2 années d'étude contre 12 années pour un OGM

Liste des effets négatifs des OGM sur la santé animale et humaine

Les effets positifs des OGM sur la santé animale été humaine

- Augmentation de la production dans certains cas
- Réduction de la concentration de mycotoxines cancérigènes (fumonosine), effet non quantifié

Etiquetage des OGM

La réglementation de l'UE prévoit trois situations distinctes:

1) Le produit contient moins de 0,9% d'un OGM accepté par l'UE pour la consommation animale ou humaine: pas d'étiquetage.
Le seuil est de 0,5% si l'OGM est accepté par les experts mais pas encore par l'UE.

2) Le produit contient plus de 0,9% d'OGM: ce produit contient un OGM.

3) Le produit est un OGM: ce produit est un OGM.

Les accords internationaux pour la consommation des OGM (Codex Alimentarius)

* Les pays qui le souhaitent donnent leur accord sur les critères internationaux de sécurité alimentaires des OGM (sur avis d'experts de la FAO, de l'OMS de l'OCDE et du Codex Alimentarius)
* Les accords signés par les différents pays font référence pour les conflits commerciaux que doit régler l'OMC

Les ratés des OGM

*** Le soja contenant de l'albumine de la noix du brésil et enrichi en lysine. Cette protéine est allergène et le soja n'a jamais été proposé à la commercialisation (Pfizer).**

*** Des pois contenant de l'α–amylase de haricot et résistants au doryphore. Les pois sont immunogènes chez la souris. L'étude a été arrêtée (CSIRO).**

*** L'alfalfa résistant à un herbicide (Roundup). Cette plante autorisée pour les pelouses aux USA a été rétirée par la Court de Washington car il risque de se disséminer sans contrôle (Monsanto).**

*** Le maïs produisant un vaccin contre un virus de porc. Des repousses de maïs ont été observées l'année suivante. L'entreprise a été condamnée (Prodigen).**

*** Les poissons fluorescents qui peuvent survivre dans les eaux tropicales. La FDA et l'EPA n'ont pas accepté de prendre ce cas en considération.**

*** Le maïs contaminé par un maïs OGM (Starlink) non autorisé (Aventis).**

*** Le riz contaminé par un riz OGM non encore autorisé (Bayer).**

*** Le blé résistant à un herbicide: un échec commercial (Monsanto)**

L'impact de l'environnement sur les cancers

* Les principales causes de cancer sont le tabac, l'alcool, le surpoids, l'alimentation, la pollution et les agents infectieux.

* La pollution dans sa globalité est responsable tout au plus de 0,1% des cancers

§ Rapport de l'Académie des sciences, de l'Académie de médecine et du Centre international de recherche sur le cancer de Lyon (2007)

Vers l'abandon des pesticides ?

* La domestication des plantes et la sélection génétique ont éliminé une partie des résistances naturelles aux maladies ce qui impose actuellement l'utilisation de pesticides.

* Un retour en arrière par une contre-sélection ou par la réhabilitation systématique de variétés anciennes est très difficilement envisageable car longue, coûteuse et très aléatoire

* L'usage des pesticides naturels ou chimiques parait donc inévitable ce qui impose d'en contrôler l'emploi aussi strictement que possible.

* L'utilisation d'OGM peut dans certains cas apporter une solution à ce problème.

L'impact des pesticides sur les cancers (1)

* Les risques actuels des pesticides pour la santé sont très surestimés alors que les avantages sont très sous-estimés.

* La quantité de pesticides répandus en France est passée de 120500 à 71600 tonnes entre 1999 et 2006.

* Le nombre de substances pesticides utilisées dans l'UE était il y a quelques années de 984 dont 611 ont été interdites avec pour objectif de n'en conserver que 250 en 2010.

* Parmi les 53 substances préoccupantes, 30 seront éliminées en 2008.

* Un pesticide n'est accepté dans l'UE que s'il est dégradé à un taux de 90% au moins en un an.

§ Pesticides, OGM, agriculture biologique et santé. Rapport de l'Académie d'Agriculture et de l'Académie de Médecine. (2008) (sous presse).

L'impact des pesticides sur les cancers (2)

* L'agriculture biologique n'apporte pas de preuve qu'elle réduit les risques pour les agriculteurs, les consommateurs et l'environnement. Les produits biologiques sont en effet plus souvent que leurs homologues conventionnels contaminés par des agents infectieux pathogènes ou par des mycotoxines cancérigènes.

* Le cuivre, le soufre ou les extraits de plantes ne sont pas toujours plus inoffensifs que les substances chimiques de synthèse.

* Une étude a montré en 1998 que la protection biologique avait nécessité 14 fois plus de matières actives que les méthodes conventionnelles appliquées de manière raisonnée.

* le programme REACH de l'UE ne peut que renforcer la tendance à réduire les risques des pesticides.

L'impact des pesticides sur les cancers (3)

* Les agriculteurs et leurs proches sont moins fréquemment atteints par les cancers qui sont parmi les plus fréquents et qui sont par exemple causés par le tabac. Les mêmes agriculteurs ont par contre légèrement plus souvent que les moyennes nationales de cancers induits par le soleil ou par des facteurs inconnus.

* Les académiciens notent qu'une bonne utilisation des pesticides nécessite une formation professionnelle renforcée des utilisateurs.

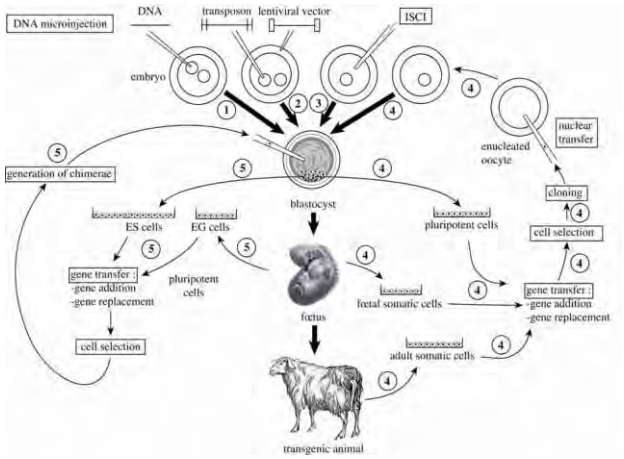
§ Pesticides, OGM, agriculture biologique et santé. Rapport de l'Académie d'Agriculture et de l'Académie de Médecine. (2008) (sous presse).

Bud Grace in *Science '85*

Maïs Ogm - Claude Ménara, agriculteur dans le Lot-et-Garonne : « On peut produire proprement sans avoir recours aux insecticides »
(Publié le 21/06/2006 à : 14H 20 min)
Claude Ménara cultive du maïs Ogm. Malgré les détracteurs, il en est fier et explique comment le maïs transgénique Bt répond aux attentes et besoins actuels. (© Terre-net)
Claude Ménara cultive aujourd'hui 100ha de maïs Bt. Un choix qui répond à ses attentes de producteur : *« La pression parasitaire se fait de plus en plus forte. Cela provoque beaucoup de dégâts et donc une chute du revenu. Nous rencontrons des problèmes au niveau de l'emploi des insecticides et des exigences sociétales. Comment produire en qualité, en quantité et de manière propre sans les biotechnologies ? »*
« Les maïs Bt sont bien plus résistants »
Pour Claude Ménara, le maïs Bt comporte des avantages intéressant dans l'obtention de la qualité, un critère aujourd'hui essentiel : *« La qualité est très importante, les acheteurs sont de plus en plus exigeants. On peut produire propre sans recours aux insecticides et sans problèmes de mycotoxines. Les maïs Bt sont bien plus résistants à la sécheresse, au vent et à la fusariose. Cela nous permet à nous producteurs d'étaler la récolte, car on sait que les maïs fusariés sont plus sensibles à la verse. Le maïs est donc plus sec, ce qui engendre moins de frais de séchage. »*
Claude Ménara souligne l'intérêt environnemental du maïs transgénique grâce à l'absence de recours aux insecticides : *« C'est quand même fabuleux pour la faune auxiliaire. On retrouve des coccinelles. »* Même si l'opinion n'est pas favorable, l'agriculteur revendique son choix : *« Je n'ai pas la prétention de faire de l'écologie tous les jours. Mais quand je mets du maïs Bt, je fais de l'écologie, que ça plaise ou non. »* Il est d'ailleurs prêt à ouvrir son exploitation pour expliquer ce qu'il fait : *« Nous avons le devoir, nous producteurs, de faire de la communication. »*

Source : Terre-net

Auteur : Bénédicte Normand



L'impact économique des semences transgéniques dans les pays en développement

En 2005, 38% des OGM ont été cultivés dans les pays en développement. Les OGM se développent plus rapidement dans les pays pauvres. Les petits agriculteurs bénéficient des OGM plus ou moins selon les pays.

*Chine: le coton apporte un bénéfice élevé aux agriculteurs et réduit l'utilisation de pesticides.

*Argentine:le soja remporte un vif succès commercial et il permet d'éliminer Dutura ferox

*Mexique: le coton est peu utilisé car peu nécessaire sous ce climat

*Inde: le coton est très apprécié sauf dans un état qui ne dispose pas d'un cultivar adapté au climat

CONCLUSION: Le succès des OGM dans les pays sont très réels et il dépend beaucoup de l'assistance technique locale et de l'état des réglementations locales

L'impact des pesticides sur les cancers

* Les risques actuels des pesticides pour la santé sont très surestimés alors que les avantages sont très sous-estimés.

* La quantité de pesticides répandus en France est passée de 120500 à 71600 tonnes entre 1999 et 2006.

* Le nombre de substances pesticides utilisées dans l'UE était il y a quelques années de 984 dont 611 ont été interdites avec pour objectif de n'en conserver que 250 en 2010.

* Parmi les 33 substances préoccupantes, 30 seront éliminées en 2008

* Un pesticide n'est accepté dans l'UE que s'il est dégradé à un taux de 90% au moins en un an.

* L'agriculture biologique n'apporte pas de preuve qu'elle réduit les risques pour les agriculteurs, les consommateurs et l'environnement. Les produits biologiques sont en effet plus souvent que leurs homologues conventionnels contaminés par des agents infectieux pathogènes ou par des mycotoxines cancérogènes.

* Le cuivre, le soufre ou les extraits de plantes ne sont toujours plus inoffensifs que les substances chimiques de synthèse.

* Une étude a montré en 1998 que la protection biologique avait nécessité 14 fois plus de matières actives que les méthodes conventionnelles appliquées de manière raisonnée.

* le programme REACH de l'UE ne peut que renforcer la tendance à réduire les risques des pesticides.

* Les académiciens notent qu'une bonne utilisation des pesticides nécessite une formation professionnelle renforcée des utilisateurs.

§ Pesticides, OGM, agriculture biologique et santé. Rapport de l'Académie d'Agriculture et de l'Académie de Médecine. (2008) (sous presse).

LISTE DES EFFETS NEGATIFS DES PRODUITS BIO

On a rapporté, au moins trois fois, le fait que des produits issus de l'AB avaient déjà fait des morts (non pas en raison d'une mauvaise qualité intrinsèque des produits AB mais en raison d'une contamination (et là, le terme est totalement justifié) par des bactéries pathogènes (et principalement E. coli H0157) donc d'une qualité sanitaire défectueuse).

1992 : « Maine Organic » contamination par E. coli : **un enfant mort** et de nombreux malaises
1996 : « Alta Dena Organic » produits laitiers contaminé par des salmonelles : produits rappelés.
1996 (nov) : « Odwalla organic juices » : contamination E. coli (49 malades, **un enfant mort**, produit rappelé.
1998 (mai) : « Stueve's Natural Milk » : contamination salmonelle : produits rappelés
1998 : Organic Parsley (Allemagne) contamination par Citrobacter freundii : 9 malades, **une mort d'enfant** reportée.
1998 : « Glaser Organic Farms » (USA) : jus contaminés par salmonelles et E. coli. Produits rappelés.
1999 (avril) : Aussie Gold organic (Australie) contamination par salmonelles : 400 malades.
1999 (oct) : The Sprout People Organic Alfalfa (USA) : contamination par salmonelles : 19 intoxications alimentaires, produits rappelés)
1999 (mai) : « Morningkand Dairy Farms » organic colby cheese (USA) contamination par listeria : produits rappelés.
1999 (mai) : « Organic Valley » vegetable soup (UK), spores botuliniques trouvées dans les cans. Produits rappelés.
1999 (juin) : « Morningkand Dairy Farms » organic cheddar cheese (USA) contamination par listeria : produits rappelés.
2000 (mai) : Tesco Markets (UK) champignons 'organic' contaminés par E. coli, produits rappelés.
Récemment en Allemagne (2005 ?) : produits AB pour bébés qui contenaient trop de pesticides.

Effets environnementaux des OGM

- Réduction des épandages d'insecticides
- Utilisation d'herbicides moins toxiques (Roundup)
- Augmentation d'insectes utiles dans les champs (coccinelles)
- Diminution de gaz à effets de serre (indirect)
- Monoculture d'OGM (soja en Argentine)
- Dissémination du colza résistant à des herbicides au Canada
- Emergence d'herbes sauvages résistantes au Roundup

Les OGM : un scénario catastrophe pour l'UE

* L'UE pourrait manquer de 3.3 millions de tonnes de nourriture animale à partir de 2009-2010.

* La lenteur avec laquelle l'AESA prend ses décisions pour accepter l'importation d'un nouvel OGM ; la pénurie d'aliment pour les animaux va donc s'établir progressivement.

* Le tarissement, même partiel, de l'alimentation importée conduira à un abattage massif des animaux qui ne pourront plus être nourris convenablement.

* Les consommateurs devront donc importer massivement de la viande à un prix élevé et qui de plus proviendra d'animaux nourris avec les OGM non acceptés dans l'UE.

Mitchell P. 2007. Europe's anti-GM stance to presage animal feed shortage? Nature Biotechnol 25: 1065-6.

Fonction biologique	Avantages attendus
Résistance aux malades	- Moindre utilisation des antibiotiques - Meilleur bien-être des animaux - Simplification des élevages - Augmentation de la production - Diminution des risques d'infections pour l'homme
Digestion et métabolisme	- Diminution de la pollution - Augmentation de la production - Meilleure utilisation de la nourriture - Adaptation à des aliments disponibles - Changements métaboliques profonds
Composition du lait	- Diminution de l'allergénicité et de l'intolérance - Optimisation de la composition en protéines - Optimisation de la composition en lipides - Protection contre les maladies (immunisation active ou passive) - Augmentation du contenu en aliments ou alicaments
Croissance de la laine	- Augmentation de la croissance de laine - Optimisation de la composition de la laine
Croissance de la carcasse	- Augmentation de la croissance musculaire - Diminution du stockage de lipides - Meilleure composition en lipides - Réduction de la consommation de nourriture
Reproduction	- Augmentation de la prolificité

Tableau 1 : *Les gènes utilisables pour améliorer les productions animales.*

Gènes	Animal	Tissus	Effets observés
Lysostaphine	Souris Vache	Glande mammaire	Effets antibactériens Réduction des mammites
Lactoferrine	Vache	Glande mammaire	En cours
Lysozyme	Chèvre Vache	Glande mammaire	Effets antibactériens Réduction des mammites
PrP (ko)	Vache	Tous les tissus	Résistance à ESB (en cours)
RNAi anti-PrP	Souris	Tous les tissus	Résistance à ESB (en cours)
Cécropine B	Poisson chat	Tous les tissus	Effets anti-bactériens
Récepteur soluble du virus d'Aujeszky	Souris	Tous les tissus	Protection contre le virus d'Aujeszky
Phytase	Porc	Glande salivaire	Réduction des rejets de phosphate
Hormone de croissance	Porc Mouton Poissons	Divers	Légère augmentation de la croissance Non augmentation de croissance, diabète Accélération de la croissance
IGF_1	Porc	Muscle	Augmentation de la croissance musculaire
Dominant négatif de la myostatine	Souris Vache Saumon	Muscle	Augmentation de la croissance musculaire

Lactase	Souris	Glande mammaire	Diminution du lactose
α-lactalbumine (ko)	Souris	Glande mammaire	Absence de lactose Faible sécrétion de lait
RNA anti-α-lactalbumine	Souris	Glande mammaire	Réduction du lactose
Phe-α-lactalbumine humaine	Mouton	Glande mammaire	Sécrétion de phe-α-lactalbumine (protéine sans phenylalanine) (encours)
α-lactalbumine bovine (GF)	Porc	Glande mammaire	Augmentation de la valeur nutritive du lait Augmentation du nombre de porcelets sevrés
β-lactalbumine (ko)	Vache	Glande mammaire	Réduction de l'allergénicité du lait (en cours)
Δ-12 désaturase	Porc	Adipocytes	Augmentation d'acide linoléique dans les adipocytes
Δ-12 désaturase	Souris	Glande mammaire	Augmentation des acides gras Ω-3 dans le lait
Ω-3 désaturase	Souris	Glande mammaire	Augmentation des acides gras Ω-3 dans le lait
Caséine-k	Souris Vache	Glande mammaire	Réduction de la taille des micelles
Immunoglobuline (IgG)	Souris	Glande mammaire	Activité antivirale (coronavirus)
Serine → Cystéine	Mouton	Divers tissus	Augmentation de la croissance de la laine
Kératines	Mouton	Kératinocytes	Changement de la composition de la laine
Enzyme de digestion des carbohydrates	Lapin Poisson	Intestin	Augmentation de la digestion des sucres (en cours)
Acetate → glucose	Mouton		Meilleure efficacité du métabolisme (en cours)

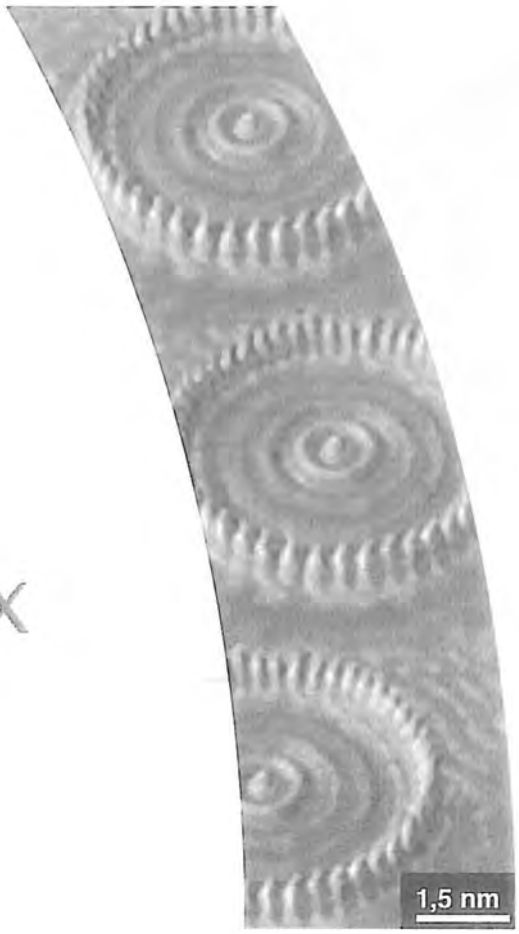
Tableau 2: *Effets de transgènes dans des tissus de différents animaux.*

LA CULTURE DES OGM DANS LE MONDE EN 2005

* 15% des récoltes mondiales sont des OGM. Ceci correspond à la moitié des terres cultivables des USA.
* 21 pays cultivent des OGM dont 11 sont des pays en développement qui cultivent 38% des OGM.
* L'augmentation de la culture des OGM est de 10-20% par an.
* L'augmentation des OGM est de 23% par an dans les pays en développement et de 5% dans les pays développés.
* La culture des OGM a fait baisser l'utilisation de pesticides de 14%.
* La culture des OGM a permis d'augmenter les revenus des agriculteurs de 6,4 milliards de dollars.

Les nanomatériaux – Sécurité au travail

Avis de l'AFSSET – Juillet 2008



Les nanomatériaux

Sécurité au travail

- **Avis de l'Afsset**
- **Rapport d'expertise collective**
- **Annexes**

afsset

agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Juillet 2008

Le Directeur général par intérim

Maisons-Alfort, le 11 juillet 2008

AVIS
de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Relatif aux « nanomatériaux et à la sécurité au travail »

Saisine Afsset n° 2006/006

L'Afsset a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire dans le domaine de l'environnement et du travail et d'évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter. Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque.

Présentation de la question posée

En réponse à une première saisine de ses ministères de tutelle en 2005, l'Afsset a réalisé un recueil d'informations scientifiques sur les caractéristiques, les applications et la toxicité des nanomatériaux. Dans la continuité de ces travaux, l'Afsset a été saisie le 29 juin 2006 par la Direction générale de la santé, la Direction de la prévention de la pollution et des risques, ainsi que par la Direction générale du travail afin de :

- obtenir des informations sur les procédures d'évaluation des dangers des substances produites en milieu industriel,
- réaliser une synthèse des évaluations des risques existantes et des moyens mis en œuvre pour garantir la protection des travailleurs,
- faire des recommandations de mesures appropriées pour garantir la protection des travailleurs et des populations riveraines susceptibles d'être exposés à des nanomatériaux manufacturés.

La demande d'expertise « nanomatériaux et sécurité au travail » des ministères à l'Afsset concernait exclusivement les travailleurs potentiellement exposés aux nanomatériaux manufacturés, ainsi que les populations riveraines des établissements employeurs. L'exposition de la population générale n'a donc pas été considérée dans ces travaux.

afsset 253 Avenue du Général Leclerc – 94701 Maisons-Alfort Cedex – n° siren 180092348
☎ 01 56 29 19 30 – 🖷 01 43 96 37 67 – site : http://www.afsset.fr – mél : afsset@afsset.fr

Contexte scientifique

Les nanomatériaux et les nanotechnologies représentent un domaine de la recherche scientifique et de l'industrie en pleine expansion. Ce développement extrêmement rapide implique cependant l'exposition potentielle aux nanomatériaux manufacturés d'une population plus importante, pour les travailleurs en milieu industriel, dans les laboratoires de recherche, ou pour les populations riveraines de ces installations. Or, si les avancées scientifiques et technologiques, ainsi que les propriétés biologiques et physico-chimiques dans ce domaine sont largement traitées lors de publications scientifiques toujours plus abondantes, bon nombre d'interrogations subsistent autour des risques pour la santé des personnes et de l'environnement. En effet, l'insuffisance de données épidémiologiques et toxicologiques, ainsi que les moyens métrologiques encore limités ne permettent pas de mener actuellement une évaluation exhaustive des risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés.

Les nanomatériaux sont composés de structures dont au moins une des dimensions varie entre 1 et 100 nanomètres (nm) - 1 nm est 1 milliard de fois plus petit qu'un mètre. -, leur conférant ainsi des propriétés physico-chimiques tout à fait particulières. Les nanomatériaux considérés sont dits manufacturés car ils sont fabriqués intentionnellement dans un cadre industriel ou au cours d'activités de recherche. Ils sont à distinguer de l'ensemble des particules de tailles inférieures à 100 nm issues à la fois du milieu ambiant naturel ou de divers processus industriels ou domestiques non destinés à la fabrication ou à l'utilisation de nanomatériaux.

Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine le 24 octobre 2006. Ce dernier a mandaté un groupe de travail « Nanomatériaux et sécurité au travail » pour la réalisation des travaux d'expertise.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité. Dans ce cadre, les déclarations publiques d'intérêt des experts et des scientifiques de l'Afsset chargés du secrétariat scientifique ne présentent pas de risque de conflit d'intérêts.

Le groupe de travail « Nanomatériaux et sécurité au travail » a statué le 21 mars 2007 sur les objectifs de la saisine ainsi que sur un plan de travail. Il s'est réuni ensuite à trois reprises entre septembre 2007 et février 2008. Le rapport des travaux du groupe de travail, incluant ses conclusions et des propositions de recommandations a été présenté au CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 29 avril 2008. Celui-ci a validé et adopté en séance la synthèse d'expertise reprenant les principales conclusions et recommandations du groupe de travail.

Avis et recommandations

Résultats de l'expertise du groupe de travail :

L'Afsset est en accord avec l'ensemble des résultats de l'expertise, les conclusions et les recommandations mentionnés dans le rapport du groupe de travail, et préconise leur mise en œuvre.

Ainsi, l'Afsset considère que les analyses rigoureuses, par le groupe d'experts, de la littérature nationale et internationale ont permis d'identifier des dangers potentiels pour l'homme et l'environnement liés à l'exposition aux nanomatériaux manufacturés. L'exposition peut avoir lieu par voie cutanée, par ingestion ou plus fréquemment, par inhalation. Les dangers identifiés reposent sur : la mise à jour des données sur la toxicité humaine des nanomatériaux (effets notamment pulmonaires, cutanés, oculaires, vasculaires, digestifs...), la génotoxicité, le danger d'explosion, et sur les données actuellement disponibles en matière d'écotoxicité des nanomatériaux.

Le rapport du groupe de travail fournit par ailleurs un état des lieux très complet de la capacité actuelle à évaluer et prévenir les risques potentiels liés aux nanomatériaux. L'analyse des réponses des acteurs de la recherche et de l'industrie au questionnaire de l'Afsset, notamment sur les pratiques mises en place en termes de prévention, ont confirmé les tendances issues de la littérature. Ces analyses font ressortir un certain nombre de limites :

- un manque évident d'outils métrologiques fiables pour caractériser efficacement l'exposition des travailleurs et des populations riveraines,
- une connaissance encore incomplète des effets des nanomatériaux sur la santé de l'homme,
- un nombre très faible de méthodes pour évaluer l'exposition à un poste de travail,
- les questions qui subsistent concernant l'efficacité des équipements de protection individuels pour l'ensemble des nanomatériaux (autres que le noir de carbone) et en conditions réelles d'utilisation.
- Seules quelques entreprises fournissent des informations dans leurs fiches de données de sécurité sur les propriétés spécifiques des nanomatériaux ou des conseils sur les mesures de protection à prendre pour limiter une exposition éventuelle aux nanoparticules. Il en est de même avec les laboratoires de recherche universitaire.

Compte tenu des données disponibles aujourd'hui sur les dangers potentiels des nanomatériaux et des limites précédemment identifiées notamment en termes de métrologie, l'Afsset souligne l'importance de la maîtrise de l'exposition des personnes aux nanomatériaux manufacturés.

De plus, l'attitude qui prévaut actuellement et qui est recommandée par de nombreux rapports scientifiques, tant en France qu'à l'étranger, consiste à considérer que l'inhalation de nanomatériaux est potentiellement dangereuse et à prendre des mesures pour éviter ou minimiser l'exposition des personnels ;

L'Afsset recommande ainsi la mise en œuvre des bonnes pratiques décrites dans le rapport produit par le groupe de travail. Ce document recueille d'une part, les pratiques de prévention existantes devant être appliquées *a minima* à tout type d'activité, d'un point de vue organisationnel et technique et, en particulier, celles données par les éléments du code du travail, de la prévention du risque chimique et des risques professionnels.

Au vu des incertitudes quant aux effets sanitaires des nanoparticules, il est plus prudent de déclarer les nanoparticules comme « niveau de danger inconnu » et de les manipuler avec la

même prudence que les matières dangereuses, c'est-à-dire d'appliquer les procédures de sécurité sanitaire qui sont utilisées pour diminuer l'exposition aux matières dangereuses.

D'autre part, il préconise de tenir compte des éléments de prévention liés au risque d'utilisation de nanomatériaux émis dans des rapports français et les guides de bonnes pratiques étrangers.

En outre, le travail des experts fait référence aux éléments de l'analyse de risque qui doivent figurer pour l'élaboration d'un dossier « recommandations et sécurité » destiné à accompagner la mise en œuvre d'une nouvelle installation ou d'un nouveau projet en rapport avec les nanomatériaux.

Les principes de « Nano-Sécurité » développés par le groupe d'experts afin de prévenir spécifiquement les risques potentiels liés aux nanomatériaux comportent :

- l'application d'une stratégie de priorité dans les mesures de prévention conformément au principe STOP (Substitution, Technologie, Organisation, Protection),
- la signalisation des risques « nano-objets » qui doit s'effectuer en fonction de deux niveaux de situation : faible ou fort risque d'aérosolisation et / ou de dispersion,
- L'archivage et la traçabilité des informations concernant l'exposition résiduelle et les conditions de travail des salariés,
- le mesurage de l'ambiance des locaux ou du personnel afin d'évaluer l'exposition résiduelle par inhalation des opérateurs aux nanomatériaux,
- le suivi médical et la formation des travailleurs nécessitant préalablement que les médecins du travail concernés soient informés des aspects spécifiques que les nanomatériaux représentent dans le domaine de la toxicologie, des modalités d'évaluation des expositions et des moyens de prévention. Ces examens médicaux pourraient constituer une source de données utiles pour la réalisation d'études épidémiologiques ultérieures.
- la mise en application des moyens de prévention conformément aux règles en vigueur relatives au transport des marchandises dangereuses (catégorie de matières faiblement toxiques à très toxiques).

Par ailleurs, l'Afsset mentionne qu'elle ne dispose pas à ce jour de données relatives à l'exposition des populations riveraines.

<u>Orientations préconisées par l'Afsset</u>

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont mis en évidence une forte implication des laboratoires de recherche autour des problématiques sanitaires potentiellement induites par les nanomatériaux. De nombreux programmes de recherche nationaux, européens et à plus grande échelle coexistent, contribuant à alimenter la connaissance sur ce sujet, mais rendant parfois difficile la communication des résultats. En accord avec les objectifs de l'OCDE, l'Afsset encourage un regroupement à l'échelle nationale des experts dans le domaine de la sécurité des nanomatériaux avec pour objectif :

- une meilleure vision de l'état d'avancement de la recherche sur les nanomatériaux appliquée à la problématique de la santé et de la sécurité au travail,
- de mutualiser et orienter les efforts de recherche en termes de toxicologie, d'épidémiologie, de métrologie et de développement des moyens de protection individuels et de préférence collectifs,

- de faciliter le développement de méthodes communes d'évaluation de l'exposition des différentes populations concernées par la conception, la fabrication ou l'utilisation des nanomatériaux manufacturés.

Comme précédemment mentionné dans le premier avis de l'agence sur les effets des nanomatériaux sur la santé de l'Homme, l'Afsset recommande de créer une base de données permettant de répertorier les principales utilisations de nanomatériaux sur le territoire français. Le règlement REACH n'étant pas spécifique aux nanomatériaux, cet outil lui serait complémentaire et constituerait un moyen de déclaration pour les acteurs concernés par l'utilisation de nanomatériaux. Les types et les quantités de nanomatériaux utilisés y seraient ainsi renseignés, ainsi que le nombre de travailleurs potentiellement exposés et les moyens de prévention mis en place.
En effet, dans l'attente de la possibilité de réalisation d'études épidémiologiques spécifique chez les travailleurs potentiellement exposés, il est indispensable de mettre en œuvre un dispositif de recensement des personnels travaillant au contact des nanomatériaux et de surveillance des conditions de travail.

L'Afsset dispose actuellement des ressources techniques et humaines pour assurer la responsabilité de la gestion de cette base de données.

Afin d'améliorer le dialogue autour des pratiques de prévention mises en place au sein des établissements producteurs ou utilisateurs de nanomatériaux manufacturés, l'Afsset encourage vivement la création d'une campagne d'information et de sensibilisation auprès des entreprises et des laboratoires dont le personnel est potentiellement exposé aux nanomatériaux. Cette campagne pourra s'appuyer sur les points suivants :

- L'importance pour les directions des établissements concernés à s'impliquer dans la mise en place, le respect et l'amélioration continue des bonnes pratiques. Ce principe d'amélioration continue est applicable à tout type et à toute taille d'établissement ;
- La nécessité d'intégrer les bonnes pratiques relatives à l'utilisation de nanomatériaux dans l'organisation et la gestion humaine appliquées à la sécurité des établissements concernés ;
- l'importance de la sensibilisation et de l'information vis-à-vis des risques chimiques en général et aux risques potentiels que représentent les nanomatériaux manipulés, en particulier dans les établissements recevant des personnels temporaires : étudiants, travailleurs occasionnels, etc. ;
- L'utilité de la participation des différents acteurs scientifiques et industriels à la réalisation d'un état des lieux exhaustif de l'utilisation des nanomatériaux en France qui permettra de réaliser une nouvelle enquête sur l'évaluation du risque nanomatériaux.

Enfin, l'Afsset s'assurera que les informations propres à l'innovation technique et à la compréhension des mécanismes du danger des nanomatériaux pour la santé humaine seront spécifiquement prises en compte dans son activité de veille scientifique et d'appui à la recherche scientifique finalisée.

Le Directeur général par intérim
Henri POINSIGNON

Emissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage

Bernard SEGUIN[(1)], Jean-François SOUSSANA[(2)]

Paru dans
« Le Courrier de l'Environnement de l'INRA »
Février 2008 – pages 79-91

Complément aux Actes du Symposium

[(1)] INRA, Mission Changement climatique et effet de serre, Unité Agroclim, site Agroparc, Domaine St Paul, 84914 Avignon cedex 9

[(2)] INRA, Unité d'Agronomie, 214 avenue du Brézet, 63039 Clermont-Ferrand cedex 2

émissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage[1]

Bernard Seguin[a], Jean-François Soussana[b]

[a]INRA, Mission Changement climatique et effet de serre, unité Agroclim, site Agroparc, domaine Saint-Paul, F-84914 Avignon cedex 9
[b]INRA, unité d'Agronomie, 214 avenue du Brézet, F-63039 Clermont-Ferrand cedex 2

seguin@avignon.inra.fr, jean-francois.soussana@clermont.inra.fr

Les questions sur la stabilité du climat, au-delà de sa variabilité que l'on pourrait qualifier de naturelle, ne datent pas d'aujourd'hui, et les progrès des sciences ont permis progressivement d'en reconstituer l'histoire, marquée par des fluctuations de grande ampleur (Acot, 2004). Pour en rester à l'épisode le plus récent (l'Holocène) qui a suivi la dernière grande glaciation, il s'est traduit par un retour à des conditions moins froides, en gros supérieures de 4 à 5°C en température moyenne globale, qui sont restées globalement stables (dans une fourchette de 1° à 2°C) depuis environ 12 000 ans, et ceci malgré des fluctuations locales assez rapides (jusqu'à 10°C en une centaine d'années, découverte récente à partir d'analyses de sédiments) ou des variations plus globales correspondant, de manière schématique et pour l'Europe, aux périodes de l'optimum médiéval du X[e] au XIII[e] siècle ou du petit âge glaciaire allant du XIV[e] au XVIII[e], bien mises en évidence par les historiens, à partir de l'analyse des séries historiques d'avancée des glaciers ou de dates de vendange (Le Roy Ladurie, 1983). Dans les années 1970, le climat apparaissait globalement stable, à condition que l'on élimine les fluctuations inter-annuelles par la prise en compte d'une durée minimale de 30 années, suivant les normes fixées par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Et les projections futures pariaient sur un retour inéluctable à des conditions glaciaires… dans 10 000 ou 20 000 ans. C'est alors que sont apparues les interrogations sur l'accroissement de l'effet de serre par l'action de l'homme et ses conséquences sur un réchauffement du climat, du coup tout aussi inéluctable, avec des ordres de grandeur de la même ampleur (de l'ordre de 4 à 5°C), mais cette fois à l'échéance du siècle à venir.

Un précédent article (Seguin, 2002) avait permis de faire un premier point sur les recherches conduites sur le sujet au sein de l'INRA. Depuis, le contexte a évolué, aussi bien au niveau mondial, avec l'évolution des connaissances synthétisées cette année 2007 dans les rapports des trois groupes de travail du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC, ou Intergovernmental panel on climate change, IPCC), qu'au niveau de l'INRA, avec la mise en place de la mission sur le changement climatique et l'effet de serre (MICCES) qui a permis de stimuler et de coordonner les travaux sur le sujet. Il est donc apparu intéressant de faire un nouveau point quelques années plus tard sur l'évolution du contexte et des connaissances.

1. Une première version de cet article était parue dans la revue *Fourrages* : B. Seguin, J.-F. Soussana, 2006. Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de gaz à effet de serre. *Fourrages*, 186, numéro spécial Prairies, élevage, consommation d'énergie et gaz à effet de serre, p. 139-154. Avec l'aimable autorisation de l'éditeur.

L'effet de serre et le changement climatique

L'effet de serre est un phénomène naturel, qui résulte de la présence dans l'atmosphère de gaz absorbant le rayonnement infrarouge thermique émis par les surfaces terrestres, et sans lequel la température moyenne du globe s'établirait aux alentours de -18°C au lieu de +15°C. C'est l'observation, au début des années 1970, d'une augmentation notable de la concentration de certains de ces gaz à effet de serre (GES), en lien évident avec l'activité anthropique, qui a conduit à envisager l'éventualité d'un changement climatique par le renforcement induit de cet effet de serre. Au premier rang de ces gaz figure le dioxyde de carbone (CO_2, communément appelé gaz carbonique) dont le niveau actuel avoisine les 380 ppm, contre 260 à l'époque préindustrielle, et qui devrait atteindre de 450 à 1000 parties par million (ppm) à la fin du siècle, suivant l'évolution des politiques énergétiques. Depuis la prise de conscience de cette influence de l'homme sur le climat global (qui n'est d'ailleurs qu'une des composantes de ce qu'on dénomme changement global), les prévisions des spécialistes du climat se sont progressivement à la fois affinées et affermies, au travers des rapports successifs du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat, GIEC (Intergovernmental panel on climate change, IPCC). Il existe maintenant un consensus très large de la communauté sur la réalité du phénomène et de ses conséquences.

Le renforcement anthropique de l'effet de serre

On sait que l'effet de serre naturel est dû à la propriété de certains gaz de l'atmosphère (dont les molécules contiennent au moins trois atomes) d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, et de le renvoyer vers cette surface, entraînant son réchauffement. La différence entre ce rayonnement émis par la surface (390 $W.m^{-2}$ en moyenne) et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace (240 $W.m^{-2}$) représente le forçage radiatif (150 $W.m^{-2}$) lié à l'effet de serre naturel de l'atmosphère. Celui-ci est augmenté par l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre provoqué par les activités humaines. Un doublement de concentration du seul CO_2 par rapport à sa concentration préindustrielle entraînerait un forçage additionnel de 4 $W.m^{-2}$ environ.

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO_2) s'est accrue de plus d'un tiers (d'environ 280 ppm à 379 ppm en 2005). Cette concentration actuelle n'a jamais été atteinte depuis 650 000 ans, comme l'indique l'analyse de bulles d'air piégées dans les glaces polaires. Le taux d'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère a atteint 1,9 ppm par an durant la dernière décennie 1995-2005, contre 1,4 de 1960 à 2005 (GIEC, 2001a). Toujours d'après ce rapport, l'accroissement de la concentration en CO_2 pendant les cent dernières années résulte de la combustion de combustibles fossiles (au niveau maintenant de 7,2 GtC/an) et des changements d'utilisation des terres, notamment la déforestation (pour 1,6 GtC/an).

Outre le dioxyde de carbone (CO_2), d'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) s'accumulent dans l'atmosphère. Au début du XXIe siècle, on peut estimer que le dioxyde de carbone contribue (hors déforestation) pour 60 % à l'effet de serre anthropique, le méthane pour 20 % et l'oxyde nitreux pour 6 %. Enfin, les chlorofluorocarbones (CFC) et d'autres gaz traces d'origine industrielle interviennent pour 14 %. La concentration en méthane (CH_4) dans l'atmosphère a été multipliée par 2,5 et elle continue à s'accroître actuellement. Les sources de méthane sont à la fois naturelles (élevage, rizières, zones humides, feux de biomasse) et industrielles (gaz naturel, charbon). Quant au protoxyde d'azote (N_2O), s'il est émis en partie par l'industrie, ce sont les sols agricoles et les décharges qui sont responsables de la majorité des émissions en France.

Les capacités de réchauffement de l'atmosphère par ces gaz sont caractérisées par deux indicateurs : le coefficient de forçage radiatif additionnel (en $W.m^{-2}$), qui traduit la relation entre l'énergie reçue et l'augmentation de température qu'elle engendre dans le système surface terrestre-troposphère, selon la définition spécifique qui en a été donnée par l'IPCC (Tegart *et al.*, 1990 ; Houghton *et al.*, 1992) ; le potentiel de réchauffement global (PRG), un indicateur qui intègre à la fois les propriétés de forçage radiatif des composés actifs et leur durée de vie dans l'atmosphère. Cet indicateur permet ainsi d'éta-

blir des équivalences entre les gaz impliqués sur une période de temps donnée et de les convertir en équivalents CO_2.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (tabl. 1) mélangés de façon homogène à la troposphère est la première cause du réchauffement. Leur forçage radiatif global depuis l'ère pré-industrielle était évalué dans ce rapport à 2,43 $W.m^{-2}$. Il est à noter que le récent rapport de 2007 donne des valeurs revues à la baisse de ce forçage, en indiquant un effet moyen depuis 1750 plutôt de l'ordre de 1,6 $W.m^{-2}$. Par ailleurs, la répartition des influences respectives actuelles (en 2004) des différents GES est un peu différente de l'analyse historique du tableau 1, puisque le poids total du dioxyde de carbone passe à près de 80% (en tenant compte des 19,4% dus à la déforestation), le méthane à 14,3% (au lieu de 20 %) et l'oxyde nitreux à 7,9% (au lieu de 6,2%), alors que les autres composés sont à environ 1% seulement maintenant au lieu de 10% dans le passé.

L'accentuation de l'effet de serre est aussi la résultante des modifications de la composition de l'atmosphère en différents autres composés, gazeux ou particulaires, distribués de façon beaucoup moins homogène que les précédents :
- l'ozone intervient, avec d'une part la destruction de l'ozone stratosphérique qui contribue à un forçage radiatif négatif évalué à -0,05 $W.m^{-2}$, avec les incertitudes liées à l'évolution de cette couche d'ozone (l'estimation de 2001 était de -0,15) ; d'autre part la production d'ozone troposphérique entraîne un forçage positif toujours estimé à 0,35 $W.m^{-2}$. Cette production d'ozone troposphérique a un caractère régional, conséquence de la localisation des émissions de composés chimiquement actifs impliqués dans sa synthèse, principalement les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et des hydrocarbures autres que le méthane.

Tableau 1. La concentration des principaux GES anthropiques mélangés de façon homogène à la troposphère et évaluation de leur contribution respective au forçage radiatif (d'après GIEC, 2001).

Gaz trace	CO_2	CH_4	N_2O	CFC-11	CFC-12	HCFC-22	CF_4
Concentration pré-industrielle	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0	0	40 pptv
Concentration en 1998	365 ppmv	1745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	533 pptv	132 pptv	80 pptv
Augmentation annuelle	1,5 ppmv/an 0,4 %/an	7 ppbv/an 0,6 %/an	0,8 ppbv/an 0,25 %/an	-1,4 pptv/an 0 %/an	4,4 pptv/an 1,4 %/an	5 pptv/an 5 %/an	1 pptv/an 2 %/an
Durée de vie (années)	50 à 200	8,4 à 12	114 à 120	45	100	12	>50 000
Contribution au forçage radiatif ($W.m^{-2}$)	1,46	0,48	0,15	0,07	0,17	0,03	0,003
Contribution au forçage radiatif (%)	60	20	6,2	2,9	7,0	1,2	0,1
Potentiel de réchauffement global	1	62	275	6 300	10 200	4 800	3900

ppmv : partie par million en volume (10^{-6}) ; ppbv : partie par milliard en volume (10^{-9}) ; pptv : partie par trillion en volume (10^{-12}).
La contribution au forçage radiatif est calculée depuis l'ère préindustrielle (1750) jusqu'à l'époque actuelle (fin des années 1990).
Le potentiel de réchauffement global (PRG) est calculé pour un horizon de 20 ans en équivalents massiques CO_2. Par exemple, une tonne de CH_4 aura, à cet horizon, 62 fois le PRG d'une tonne de CO_2.

ensuite, les aérosols auxquels une attention particulière a été portée au cours des dernières années. En effet, ils dispersent le rayonnement solaire et exercent dans l'ensemble un forçage radiatif négatif, à l'exception des poussières de noir de carbone qui exercent un forçage positif. Les contributions humaines aux aérosols (principalement sulfates, carbone organique, suie, nitrates et poussières) ont ensemble un effet de refroidissement, avec un forçage radiatif direct total de - 0.5 $W.m^{-2}$ et un forçage indirect par l'albedo des nuages de - 0.7 $W.m^{-2}$.

À ces modifications de la composition de l'atmosphère, les physiciens ajoutent des effets des changements d'albedo de surface, liés aux changements du couvert végétal et à la déposition de suie sur la neige (-0,2 $W.m^{-2}$), ainsi que le forçage radiatif dû à la variation d'irradiance totale du soleil évaluée de 1 750 à aujourd'hui à 0,12 $W.m^{-2}$ (contre 0,30 dans le 3e rapport). On peut encore ajouter le forçage ponctuel lié au volcanisme tel qu'il s'est manifesté dans les années 1990 avec l'éruption du Pinatubo.

Le changement climatique : les prédictions pour le futur

À la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO_2 situées entre 540 et 970 ppm, à comparer avec une concentration avant la révolution industrielle de 280 ppm et avec une concentration actuelle d'environ 380 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface était estimé devoir être de 1,5 à 6°C de 1990 à 2100, et les simulations effectuées pour le 4e rapport ne changent pas fondamentalement la donne : pour la fin du siècle, la gamme de réchauffement en fonction des scénarios d'émission de GES va de 1,8°C (avec une fourchette de vraisemblance de 1,1 à 2,9) à 4,0°C (fourchette de 2,2 à 6,4) (fig. 1). Cette augmentation serait sans précédent dans les 10 000 dernières années. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide.

L'élévation du niveau des mers était prévue en 2001 de 0,14 à 0,80 m de 1990 à 2100 ; elle a été actualisée à une fourchette plus resserrée de 0,18 à 0,59 m, ce qui reste de deux à quatre fois le taux observé pendant le XXe siècle. Une perte majeure de glace de l'Antarctique et une élévation accélérée du niveau des mers sont jugées comme très peu probables au XXIe siècle, mais de fortes incertitudes pèsent sur les conséquences de la fonte des glaciers, déjà significative, et ultérieurement du Groenland.

Une comparaison des scénarios les plus récents d'évolution de la pluviométrie saisonnière dans 32 régions du monde faite par le groupe II du GIEC montre une tendance à l'augmentation pour l'Europe du Nord (0 à +3% par décennie) au printemps, à l'automne et en hiver. En revanche, pour la zone Europe du Sud et Afrique du Nord, les modèles prédisent une réduction de la pluviométrie estivale (de -0,2 à -6% par décennie), qui pourrait également intervenir en Europe du Nord (de -1,8 à +0,8% par décennie). Une tendance similaire à un assèchement estival se retrouve dans les simulations concernant d'autres régions de l'hémisphère Nord (Amérique du Nord, Chine, Méditerranée), même si cette tendance est loin de constituer une certitude.

Les conclusions du GIEC concernant les tendances observées et prévues pour différents événements climatiques extrêmes avaient été classées en 2001 selon leur niveau de probabilité, et le rapport de 2007 n'a pas fondamentalement changé le diagnostic actuel. On retiendra parmi les conclusions très probables (à plus de 95%) une augmentation des températures maximales et de la fréquence des jours chauds, une augmentation des températures minimales et une diminution de la fréquence des jours froids (ou encore des gelées). Les conclusions (dont la probabilité est supérieure à 75 %) concernent une diminution de l'amplitude thermique journalière, des précipitations plus fréquentes et plus intenses, des vagues de chaleurs plus fréquentes et, inversement, des vagues de froid moins fréquentes, une augmentation des épisodes de fortes pluies hivernales et, enfin, une augmentation de la fréquence des sécheresses estivales dans les régions continentales situées à des latitudes intermédiaires. Enfin, la vitesse maximale du vent, ainsi que l'intensité des précipitations, devraient augmenter lors des cyclones tropicaux.

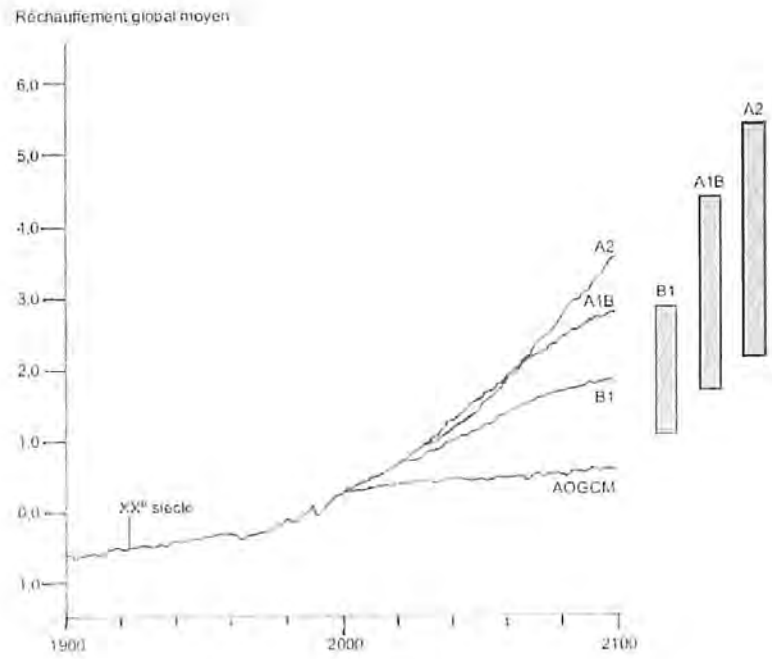


Figure 1. Évolution de la température globale pour plusieurs modèles climatiques et scénarios d'évolution du CO_2 (d'après le rapport du GIEC, 2007a).

Le changement climatique : les évolutions récentes à l'échelle globale et leur attribution

L'analyse de séries historiques provenant de milliers de stations réparties sur l'ensemble du globe a nécessité la mise en œuvre de procédures complexes d'homogénéisation (pour prendre en compte les problèmes causés par les évolutions techniques des stations et des capteurs, ainsi que des changements de site ou d'environnement de ces sites). C'est donc seulement depuis quelques années qu'il a été possible d'établir sans ambiguïté les éléments suivants, repris ci-dessous à partir du rapport du GIEC de 2001 et de la synthèse ultérieure de Salinger (2005) :

pour la température, un réchauffement de l'ordre de 0,6° C depuis 1860, la date la plus ancienne pour laquelle des données suffisantes existent à l'échelle du globe. Le réchauffement du XX^e siècle est probablement le plus important de ceux constatés depuis les dernières mille années, et la décennie précédant 2004 était la plus chaude de toutes celles considérées : 9 des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2004 (la plus chaude étant 1998, avec 0,58° C au dessus de la moyenne 1981-1990), avec la seule année 1996 remplacée par 1990 dans ce classement (Jones et Moberg, 2003). Il est à noter que, depuis, 2005 et 2006 se sont ajoutées à ce hit-parade, respectivement en 2^e et 6^e positions. Deux périodes de réchauffement apparaissent à partir de ces travaux : de 1910 à 1945, avec une augmentation de 0,14° C, puis 0,17° C pour 1976-1999 (fig. 2).

au niveau de la distribution spatiale, la première phase a vu un réchauffement plus marqué de l'hémisphère Nord, contrairement à la phase suivante. Par contre, depuis 1976, le réchauffement est le plus net

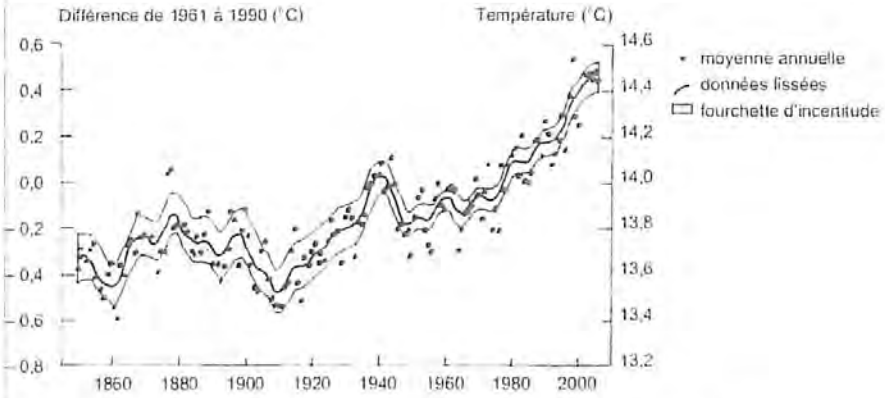


Figure 2. Évolution de la température globale depuis 1850 (d'après GIEC, 2007a).

aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, et sur les surfaces continentales, qui se réchauffent plus que les surfaces océaniques. Il faut également noter que les températures minimales augmentent deux fois plus vite que les maximales.

pour les précipitations, la tendance est moins claire : les mêmes sources indiquent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle à l'échelle globale, cependant très modérée (2‰) et surtout très variable dans le temps et l'espace : elle peut atteindre 7 à 12 % dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord, surtout à l'automne et en hiver pour les régions boréales. La pluie a diminué sur la plupart des terres intertropicales (-0,3‰ par décennie), quoiqu'il y ait une reprise durant les dernières années. Il est probable qu'une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes s'est produite dans les latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord. Les épisodes chauds du phénomène « El Niño» ont été plus fréquents, plus durables et plus intenses depuis le milieu des années 1970. Au niveau de l'Europe, les observations sont plus contrastées (EEA, 2004) : elles font état d'un accroissement pouvant aller de 10 à 40 % sur le siècle passé pour les régions du nord, en particulier en hiver, et d'une baisse significative de la pluviométrie en zone méditerranéenne (jusqu'à 20 ‰, dont 10 ‰ en période estivale).

au niveau des autres facteurs, il a surtout été détecté une baisse (de 4 à 6 ‰) du rayonnement solaire global sur la période 1950-1990 (Roderick et Farquahr, 2002), mais cette tendance paraît s'inverser avec une augmentation sur les 15 dernières années (Wild *et al.*, 2005).

Ces évolutions des facteurs climatiques s'accompagnent d'observations sur celles de la cryosphère et des océans. La surface de la couverture neigeuse a diminué d'environ 10‰ depuis la fin des années 1960 et la période de glaciation des lacs et des rivières a été réduite de deux semaines dans l'hémisphère Nord durant le XX^{e} siècle. Il y a eu un retrait général des glaciers de montagne dans les régions non polaires durant le XX^{e} siècle. La superficie de la glace de mer a diminué de 10 à 15‰ dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950. Une diminution de l'épaisseur de la glace de 40‰ en Arctique s'est probablement produite à la fin de l'été pendant les dernières décennies, ce déclin étant beaucoup plus prononcé en hiver. Les données sur les marées montrent que le niveau moyen des mers s'est élevé de 10 à 20 cm pendant le XX^{e} siècle. Il est très probable que cela est dû au moins en partie à l'expansion thermique de l'eau de mer et à la perte de glace associée au réchauffement. Ce rythme de variation du niveau d'élévation des mers a été environ dix fois plus important que pendant les derniers 3 000 ans.

Pour finir, le diagnostic formulé par le GIEC est clair, ainsi que le montre la synthèse des messages essentiels que l'on peut tirer du document : « le réchauffement du système climatique est maintenant

reconnu sans équivoque, car évident dans les observations de l'accroissement des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et de l'océan, la fonte généralisée de la neige et de la glace, et l'élévation du niveau moyen mondial de la mer. Les informations paléo-climatiques confirment l'interprétation que le réchauffement du dernier demi-siècle est atypique sur au moins les 1 300 dernières années. La dernière fois que les régions polaires ont été significativement plus chaudes qu'actuellement pendant une longue durée (il y a environ 125 000 ans), la réduction du volume des glaces polaires a conduit à une élévation du niveau des mers de 4 à 6 mètres. L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^{e} siècle est très vraisemblablement dû à l'augmentation observée des gaz à effet de serre anthropiques. On peut maintenant discerner des influences humaines dans d'autres aspects du climat, comme le réchauffement de l'océan, les températures continentales moyennes, les températures extrêmes et la structure des vents ».

Le changement climatique récent en France

Pour le territoire français, ces grandes lignes se retrouvent, avec des nuances (Moisselin *et al.*, 2002). En ce qui concerne la température (fig. 3), le réchauffement y est plus marqué en moyenne, de l'ordre de 0,9 °C, en particulier dans le nord et l'ouest pour les minimales et dans le sud pour les maximales.

Pour les pluies, les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le XX^{e} siècle et un changement de sa répartition saisonnière : moins de précipitations en été et davantage en hiver. Des contrastes nord-sud apparaissent : on trouve quelques cumuls annuels de précipitation en baisse sur le sud du territoire français. L'étude de l'indice de sécheresse de De Martonne montre des noyaux de sécheresse accrue sur les régions les plus méridionales. Au nord du territoire, au contraire, l'augmentation conjuguée des précipitations et des températures conduit à un climat plus humide, ce qui traduit une accélération du cycle de l'eau.

Au niveau de l'insolation apparaît une tendance nette à une diminution dans le nord (–11%) et une augmentation dans le sud (+7%) (Moisselin et Canellas, 2005).

Quant aux événements extrêmes, si l'on a pu noter un peu partout dans le monde et dans le cas de la France en particulier des épisodes récents ayant eu des conséquences dramatiques (tempête de décembre 1999, plusieurs épisodes cévenols automnaux intenses, sécheresses fréquentes depuis 1976, avec

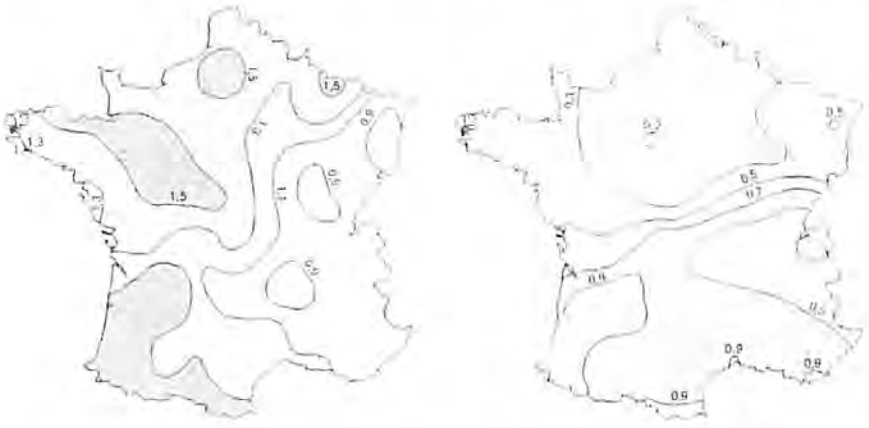


Figure 3. Réchauffement en France au cours du siècle passé (d'après Moisselin *et al.*, 2002). À gauche les augmentations des températures minimales, à droite celles des températures maximales (°C). Source Météo-France.

la répétition de 2003, 2004 et 2005), il est encore difficile pour les climatologues de conclure à une tendance significative. Par contre il est à noter un impact de plus en plus marqué, en particulier pour les compagnies d'assurance, dû pour partie aux modifications de l'occupation du sol (en particulier à la progression de l'urbanisation et à l'augmentation corollaire des surfaces imperméables favorisant le ruissellement) et, parfois, à l'abandon de l'entretien de structures permettant l'infiltration de l'eau (terrasses) ou son évacuation (canaux). Moisselin et Dubuisson (2006) ont cependant noté, sur la période 1951-2000, des traces d'augmentation de la variabilité sur les températures maximales, ainsi qu'une augmentation des sécheresses estivales et un allongement des périodes pluvieuses.

Les impacts observés sur les écosystèmes terrestres

Comme le climat, et en partie à cause de lui, les écosystèmes terrestres, qu'ils soient naturels ou cultivés, conjuguent une variabilité à différentes échelles temporelles et une évolution à long terme. Celle-ci traduit un déplacement de l'équilibre correspondant à un état stationnaire sur une période donnée. L'attribution d'un changement écologique à ce réchauffement climatique récent n'est pas une question scientifique facile. D'une part, de nombreux facteurs autres que le climat agissent sur les réponses de différents systèmes ou secteurs (en premier lieu les facteurs anthropiques allant de l'économie à l'utilisation de la surface ou la modification du type d'occupation, en passant par les pollutions diverses dans l'atmosphère, les eaux et les sols) ; d'autre part, les impacts éventuels ne se répercutent pas forcement en réponse immédiate au forçage climatique, et un temps de latence de durée variable caractérise l'inertie de différents systèmes. Il est donc logique que ces impacts soient seulement réellement identifiés depuis peu, avec quelques années de recul par rapport à la mise en évidence effective du réchauffement qui date seulement de la fin des années 90. Il faut aussi que des chercheurs de diverses disciplines soient stimulés afin de se mobiliser pour analyser une tendance éventuelle à travers leurs propres données, ce qui se fait progressivement actuellement.

Au niveau global

Au niveau global, les impacts observés étaient ainsi pratiquement absents des deux premiers rapports du GIEC, et sont apparus en tant qu'information significative seulement pour le 3e rapport (GIEC, 2001). L'analyse effectuée alors, à partir de 2 500 articles publiés, portait uniquement sur les relations avec la température, en recherchant trois critères qui devaient être satisfaits simultanément : un changement observé sur au moins dix années, pouvant être corrélé de manière déterministe à un changement de température, et un changement simultané de température. Deux grandes catégories ont ainsi été mises en évidence :

44 études sur les plantes et les animaux, couvrant 600 espèces, dont 90 % (plus de 550) ont montré des signes de changement, et 80 % (plus de 450) allaient dans le sens attendu ;

16 études sur les glaciers, la couverture neigeuse et la glace sur les lacs ou les fleuves portant sur 150 sites. Environ 100 (67 %) montraient une évolution, dont 99 dans la direction attendue.

Les travaux préparatoires à la publication du 4e rapport (GIEC, 2007b) ont permis d'actualiser ces données globales (qui portent le nom de méta-analyses) : 13 études pour les changements dans la cryosphère, 22 pour l'hydrologie et les ressources en eau, 30 sur les processus côtiers, 37 sur les systèmes biologiques marins et d'eau douce, 156 sur les systèmes biologiques terrestres, et 32 sur l'agriculture et la forêt (soit 258 au total, à comparer aux 60 études mentionnées ci-dessus dans le 3e rapport).

En nous limitant aux écosystèmes continentaux, les effets observés peuvent être résumés ainsi :

pour la cryosphère, une fonte accélérée, qui se traduit par un recul généralisé des glaciers, une augmentation du ruissellement et des débits dans les zones glaciaires ou nivales, ainsi que des avalanches de glaces et de rochers, le déplacement des mammifères dans l'Arctique et de la faune de l'Antarctique, la fonte du permafrost dans les hautes latitudes, le déplacement vers le haut de stations de ski, *etc.* ;

pour l'hydrologie et les ressources en eau, l'accroissement des sécheresses en zones arides et semi-arides, les inondations et les glissements de terrain pendant la saison chaude en zones montagneuses ;

– pour les eaux douces, fleuves et rivières se réchauffent, avec des conséquences bien établies sur la stratification thermique et la composition chimique, l'abondance et la productivité, la composition des communautés, la phénologie[2], la distribution et la migration des espèces végétales et animales ;
– pour les systèmes biologiques terrestres, des réponses bien établies dans l'hémisphère Nord, avec une avancée généralisée de la phénologie au printemps, et une saison de végétation plus longue. La population de certaines espèces a diminué ou même disparu, et des mouvements vers le nord ou des altitudes plus élevées ont été observés ;
– pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du nord, avec une saison de végétation sans gel allongée (en partie sans doute à l'origine de l'augmentation de la productivité forestière, de l'ordre de 30 à 40%, maintenant confirmée par des observations satellitaires). En dehors de l'observation d'une avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l'illustration la plus nette se situe en viticulture, particulièrement sensible à ce réchauffement : l'ensemble des régions viticoles de ces mêmes zones montre une avancée des stades phénologiques, qui se répercute sur les dates de vendange, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sucre et du degré alcoolique qui conduit, pour les vingt dernières années, à des vins généralement de haute qualité. Pour la forêt, on a observé également une avancée des dates de débourrement de l'ordre de 5 à 8 jours sur l'Eurasie, une migration vers le nord de la limite entre la forêt et la toundra et une augmentation des feux de forêt au Canada, ainsi qu'une extension de certains insectes aux États-Unis.

Au niveau européen

En Europe, le récent état des lieux effectué par l'Agence européenne de l'environnement (EEA, 2004) retient les tendances constatées sur une sélection d'indicateurs qui recoupe les systèmes et secteurs considérés par le GIEC : retrait des glaciers pour 8 sur 9 des régions concernées (avec un recul d'ensemble évalué à un tiers de la surface et la moitié de la masse entre 1850 et 1980, et 20 à 30 % de perte supplémentaire depuis, dont 10% pour le seul été 2003), diminution de la période de couverture neigeuse de 8,8 jours par décennie entre 1971 et 1994 dans une zone entre 45° et 75° de latitude nord), augmentation de la saison de végétation de 10 jours entre 1962 et 1995 et de la productivité de la végétation de 12 %, migration vers le nord et vers le haut de plantes (diversité enrichie de l'Europe du nord-ouest et en montagne pour 21 de 30 sommets alpins), accroissement du taux de survie de populations d'oiseaux hivernant en Europe, *etc.*

Au niveau français

En France, si les agriculteurs (et les éleveurs) font état d'une modification des calendriers culturaux qui pourrait être liée à cette particularité climatique, ce que confirment d'ailleurs des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'INRA (pratiquement un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire), il n'a pas encore été possible de l'apprécier de manière objective, pas plus que d'évaluer son poids éventuel dans l'évolution récente des rendements. Par contre, l'analyse des données phénologiques (dates d'apparition des stades de développement) sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures a priori beaucoup moins dépendantes sur ce point des décisions culturales, a permis de mettre en évidence des avancements significatifs de stades tels que la floraison des arbres fruitiers. L'article précédent (Seguin, 2002) comportait déjà les observations sur l'avancée des stades de floraison des arbres fruitiers (une dizaine de jours en trente ans sur des pommiers dans le sud-est) ou des dates de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années, Ganichot, 2002). Ces observations, étendues pratiquement à l'ensemble du territoire français, avec évidemment des variantes suivant les espèces et les lieux, se sont confirmées depuis, et ont même été notablement amplifiées, en particulier pour la vigne (Seguin, 2007).

Pour celle-ci, l'augmentation de température moyenne s'est traduite par des conditions globalement plus favorables et avec moins de variabilité inter-annuelle pour tous les vignobles français, avec une augmentation de teneur en alcool (de 1 à 2 degrés suivant les régions) et une diminution de l'acidité. La même avancée phénologique est également détectable pour les forêts.

2. Étude des variations, en fonction du climat, des phénomènes périodiques de la vie végétale et animale (*Le Petit Robert*).

La productivité des forêts a augmenté depuis le début du siècle (de l'ordre de 30 à 40 %), sans qu'il soit encore possible de l'attribuer à un effet déjà marquant de l'augmentation du gaz carbonique, du réchauffement ou d'une fertilisation par l'azote contenu dans les pluies (cette dernière hypothèse tenant la corde d'après les travaux récents de l'INRA de Nancy). Il faut souligner que l'augmentation du CO_2 atmosphérique, en interaction avec le réchauffement et avec la variation de la pluviométrie, aura des effets importants sur la productivité végétale, sur l'économie de l'eau et sur le bilan des nutriments (Tubiello *et al.*, 2007).

Au niveau des insectes et maladies, il apparaît certains signes indiscutables que l'on pourrait relier directement au changement climatique : extension vers le nord et en altitude de la chenille processionnaire du pin, observations sur le cycle du carpocapse qui a vu l'apparition d'une troisième génération, augmentation de la diversité des pucerons également concernés par l'avancée de la phénologie ; à l'inverse, extinction du phomopsis du tournesol dans le sud-ouest après la canicule de 2003. Il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. D'où les interrogations actuelles sur des maladies émergentes dans le monde animal (fièvre du Nil sur les chevaux en Camargue), mais aussi végétal : une mouche blanche (*Bemisia tabaci*) originaire des régions subtropicales a été repérée depuis une dizaine d'années en Europe, et menace actuellement les cultures sous serre du Sud du continent.

Ces différentes observations proviennent pour une très large part des travaux de l'INRA dans les domaines de l'agriculture et de la forêt (voir le site *www.inra.fr/changement_climatique*). Pour une vision plus large sur les milieux naturels, elles peuvent être complétées par celles rassemblées dans l'ouvrage de Dubois et Lefèvre (2003) et le livret édité par le Réseau Action climat France (2005).

Conclusion : le réchauffement et l'effet de serre

Les observations récentes attestent, au minimum, d'un réchauffement significatif depuis 1860 au niveau global, avec une accentuation marquée depuis les années 1980. Il est évidemment variable à la fois dans

le temps et dans l'espace, mais la tendance générale paraît indiscutable et bien établie par les impacts directs ou indirects sur les milieux naturels et certaines activités humaines. Il est maintenant fortement probable qu'il soit causé par l'augmentation de l'effet de serre évalué dans les modèles climatiques, comme l'a établi clairement le rapport du GIEC de 2007.

À l'issue de cette revue, plusieurs commentaires finaux nous paraissent de nature à accompagner ce diagnostic, par rapport à l'agriculture et l'élevage dans le contexte français :

• les observations prennent en compte essentiellement les effets moyens du réchauffement observé depuis une vingtaine d'années (avec, pour les conséquences sur la phénologie, une rupture diagnostiquée à la période 1985-1989). Bien sûr, en complément de cette tendance de fond, les années récentes ont vu se manifester des événements climatiques que l'on peut qualifier d'exceptionnels (par leur écart avec les valeurs normales ou moyennes), avec en premier lieu la canicule et sécheresse de 2003, mais aussi les sécheresses ultérieures (en particulier 2005 et 2006), puis l'hiver doux de 2006. Manifestement, ces épisodes ont des impacts instantané (ou plus tardif, compte-tenu des répercussions ultérieures) d'un ordre de grandeur égal ou notablement supérieur à celui de l'évolution moyenne. Il est certain que celle-ci sera déterminante à long terme, mais que la variabilité et son évolution en termes d'événements extrêmes joueront un rôle tout aussi important dans le futur. C'est, sans doute, à l'heure actuelle, le facteur limitant pour prétendre pronostiquer ou préfigurer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes en général, et cultivés en particulier ;
• quelle que soit l'action collective sur les émissions de GES, il apparaît maintenant très peu probable d'échapper à un réchauffement global d'au minimum 2 à 3°C pour la fin du siècle, et en conséquence inévitable de prévoir des mesures d'adaptation (Howden *et al.*, 2007), évidemment variables suivant les productions et les régions, mais qui auront un socle commun. Celui-ci sera, pour partie, technique (avec une forte interaction entre la génétique et l'agronomie), mais devra évidemment tenir compte du contexte économique et social (avec, au premier rang, la compétition sur l'eau qui sera accrue dans un climat plus chaud et plus sec en été, en particulier dans le Sud, voir l'expertise récente sur la sécheresse d'Amigues *et al.*, 2006) ;
• un point très important concerne justement la question de l'avenir de ces émissions. Nous ne l'avons pas abordé dans ce panorama, mais l'apport du rapport du GIEC de 2001, et surtout de celui de 2007, était de commencer à préfigurer un avenir climatique à géométrie variable suivant les scénarios d'émission. Il est maintenant bien établi que nous avons collectivement le choix, par notre action dans les vingt à trente prochaines années, d'un réchauffement encore modéré de l'ordre de 2 à 3° C (à mettre en rapport avec une gamme de variation de la température moyenne annuelle de la France métropolitaine depuis 1900 d'amplitude 2°C d'après Météo-France) ou, au contraire, allant vers les 5°C si on prolonge la tendance annuelle. Les impacts de ce cas de figure sont beaucoup plus difficiles à cerner, mais sont porteurs dans tous les cas de risques notablement amplifiés.

L'impérieuse nécessité de limiter l'ampleur de la perturbation engendrée par l'augmentation des GES apparaît de plus en plus clairement. Sur ce point, l'agriculture et l'élevage ont un rôle important à jouer. À l'heure actuelle, ce secteur est responsable de près de 20% des émissions de GES au niveau français, et de 15% au niveau du globe, dues essentiellement au méthane et à l'oxyde nitreux. D'un autre côté, les sols agricoles peuvent stocker du carbone (Arrouays *et al.*, 2002), ce qui peut améliorer le bilan pour l'effet de serre, comme le montre l'exemple des prairies (Soussana *et al.*, 2007). Il faut donc dès maintenant s'engager sur une voie de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de conservation ou d'accroissement des stocks de carbone dans le secteur agricole, tout en adaptant l'agriculture au changement climatique. Ces deux enjeux ne sont pas indépendants. Par exemple, la canicule de l'été 2003 s'est accompagnée d'effets négatifs sur la production agricole (Amigues *et al.*, 2006), mais aussi d'un déstockage de carbone des agroécosystèmes (Ciais *et al.*, 2005). Pour faire face à ce type d'événements, dont la fréquence augmentera vraisemblablement à l'avenir, il faudra développer des stratégies permettant une meilleure résilience des systèmes de culture et des sols.

Le contexte institutionnel a récemment changé, en mettant ces questions au premier plan de l'actualité. Au-delà des aspects techniques sur des points élémentaires, c'est maintenant une analyse globale qui est devenue nécessaire pour faire l'inventaire des points positifs et négatifs, en tenant compte des

nombreuses interactions mises en jeu. Cette analyse a fait l'objet de premières études pour les biocarburants. Elle a également conduit à évaluer l'ensemble des composantes du bilan des GES pour comparer des systèmes d'élevage à caractère intensif contrasté (Allard *et al.*, 2007) et évaluer les impacts et l'adaptation au changement climatique (Howden *et al.*, 2007). Un récent rapport (FAO, 2006) est encore allé plus loin dans la globalité de l'analyse, en montrant les interconnections entre secteurs, soulignant le poids décisif de la déforestation sur les externalités de l'élevage. Quelles que soient les critiques qui peuvent être formulées sur son contenu, il a le mérite d'indiquer une direction nécessaire pour conduire à une analyse de synthèse d'un secteur, toute conclusion partielle étant souvent contredite à l'échelle supérieure. La grande difficulté réside dans le dimensionnement adéquat du domaine d'étude, mais il ne paraît pas inutile d'aller jusqu'à la consommation et au mode de vie en bout de chaîne ■

Références bibliographiques

Acot P., 2003. *Histoire du climat*. « Pour l'histoire », Perrin, Paris, 309 p.

Allard V., Soussana J.F., Falcimagne R., Berbigier P., Bonnefond J.M., Ceschia E., D'hour P., Henault C., Laville P., Martin C., Pinares-Patino C., 2007. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO_2, N_2O and CH_4) of semi-natural grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(1-2), 47-58.

Aubigues J.P., Debaeke P., Iiler B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (éds.), 2006. *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA, Paris, 72 p.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (éds.), 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA, Paris, 332 p.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogee J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grunwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533.

Dubois P.J., Lefèvre P., 2003. *Un nouveau climat. Les enjeux du réchauffement climatique*. La Martinière, Paris, 255 p.

Dupouey J.L., Arrouays D., Balesdent J., Gabrielle B., Gosse G., Pignard G., Seguin B., Soussana J.F., 2005. Rôle de l'agriculture et des forêts dans l'effet de serre. In : *Chimie verte*, P. Colonna ed., Lavoisier, 447-486.

EEA, 2004. *Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment*. European Environment Agency (Report n°2/2004), Copenhague, 107 p.

FAO, 2006. Livestock's long shadow, environmental issues and options. FAO, Rome, 408 p. *http://www.virtualcentre.org/en/library/key_pub/longshad/A0701E00.pdf*

Garchot B., 2002. Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. In Actes des VI^e^ Rencontres rhodaniennes, Institut Rhodanien, Orange, 38-41.

GIEC, 2001. *Climate change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 850 p.

GIEC, 2001a. *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.

GIEC, 2007a. *Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers*. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website; aussi accessible en version française sur le site de la MIES *(www.effet-de-serre.gouv.fr/groupe_de_travail_i_du_giec__2007*

GIEC, 2007b. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers*. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website; www.ipcc.ch, version française sur le site web de la MIES, *www.effet-de-serre.gouv.fr/groupe_de_travail_ii_du_giec__2007*

GIEC, 2007c. *Climate change 2007: mitigation of climate change. Summary for policymakers*. Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, website; www.ipcc.ch, version française sur le site web de la MIES, *www.effet-de-serre.gouv.fr/groupe_de_travail_iii_du_giec__2007*

HOUGHTON J.T., CALLANDER B.A., VARNEY S.K. (EDS.), 1992. *Climate change 1992. The supplementary report to the IPCC scientific assessment*. IPCC Scientific Assessment Working Group. Cambridge University Press, Cambridge, 200 p.

HOWDEN S.M., SOUSSANA J.F., TUBIELLO F.N., CHHETRI N., DUNLOP M., MEINKE H., 2007. Adapting agriculture to climate change. *PNAS*, 104(50), 19691-19696.

JONES P.D., MOBERG A., 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16(2), 206-223.

LE ROY LADURIE E., 1983. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion (Champs), Paris, tome I : 287 p., tome II : 254 p.

MOISSELIN J.M., DUBUISSON B., 2006. Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^{e} siècle en France. *La Météorologie*, 54, 33-42.

MOISSELIN J.M., CANELLAS M., 2005. Longues séries d'insolation homogénéisées en France. *CR. Géoscience*, 337, 729-734.

MOISSELIN J.M., CANELLAS M., SCHNEIDER M., DUBUISSON B., 2003. Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques. *Actes des journées AMA édités par Météo-France*, Toulouse, 95-98.

MOISSELIN J.M., SCHNEIDER M., CANELLAS M., MESTRE O., 2002. Les changements climatiques en France au XX^{e} siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38, 45-56.

RAC-FRANCE, 2005. *Changement climatique : la nature menacée en France*. Réseau action climat-France, FNE, WWF, LPO, Greenpeace, Paris, 24 p. *http://www.rac-f.org/DocuFixes/livret_biodiversite.pdf.zip*

RODERICK M.L., FARQUHAR R.G.D., 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410-1411.

SALINGER J.M., 2005. Climate variability and change :past, present and future- an overview. *Climatic Change*, 70(1-2), 9-29.

SEGUIN B., 2002. La recherche agronomique face à l'effet de serre. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 46, 5-20.

SEGUIN B., DOMERGUE M., GARCIA DE CORTAZAR I., BRISSON N., RIPOCHE D., 2004. Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne. *Lettre PIGB-PMRC France Changement global*, 16, 50-54.

SEGUIN B., 2007. Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture. Communication au colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?* organisé par la chaire Unesco Vin et culture de l'Université de Bourgogne, Dijon, 28-30 mars 2007.

SOUSSANA J.F., ALLARD V., PILEGAARD K., AMBUS C., CAMPBELL C., CESCHIA E., CLIFTON-BROWN J., CZOBEL S., DOMINGUES R., FLECHARD C., FUHRER J., HENSEN A., HORVATH L., JONES M., KASPER G., MARTIN C., NAGY Z., NEFTEL A., RASCHI A., BARONTI S., REIS R.M., SIRIBA U., STEFFANI P., MANCA G., SUTTON M., TUBA Z., VALENTINI R., 2007. Full accounting of the greenhouse gas (CO_2, N_2O, CH_4) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(1-2), 121-134.

TEGART W.J.MC G., SHELDON G.W., GRIFFITHS D.C. (eds), 1990. *Climate change : the IPCC impacts assessment*. Australian Government Publishing Service, Canberra, Australie.

TUBIELLO F.N., SOUSSANA J.F., HOWDEN M., 2007. Crop and pasture response to climate change. *PNAS*, 104(50), 19686-19690.

WILD M. *et al.*, 2005. From dimming to brightening : decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, 308, 847-850.